ESTUDIO DE LA PROPAGACIÓN DE ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS EN UN MEDIO CONFORMADO POR LODOS A BASE DE AGUA PARA APLICACIONES EN EL SECTOR PETROLERO

CAMILA MENDOZA HERRERA

WILMAR LEONARDO JERÉZ DÍAZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS

ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

BUCARAMANGA

2015

ESTUDIO DE LA PROPAGACIÓN DE ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS EN UN MEDIO CONFORMADO POR LODOS A BASE DE AGUA PARA APLICACIONES EN EL SECTOR PETROLERO

CAMILA MENDOZA HERRERA

WILMAR LEONARDO JERÉZ DÍAZ

Trabajo de Grado para optar al título de

Ingeniero Electrónico

Director

ERNESTO AGUILERA BERMUDEZ

Ingeniero Electrónico

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS

ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

BUCARAMANGA

2015

TABLA DE CONTENIDO

Pág.

INTRODUCCION…….....		16
1.	OBJETIVOS……	18
1.1	Objetivo general…….....	18
1.2	Objetivos específicos……	18
2.	MARCO TEORICO……	19
2.1	Ecuaciones de Maxwell……	19
2.2	Ondas electromagnéticas planas…….	20
2.3	Modelo analítico de propagación……	23
2.3.1	Fórmula de transmisión de Friis……...	24
2.3.2	Constante de propagación……	24
2.3.3	Modelo de propagación de onda……..	25
2.4	Antenas…….	27
2.4.1	Medición de ganancia……	27
3.	CARACTERIZACIÓN DEL MEDIO……..	28
3.1	Implementación del modelo analítico de propagación……..	28
3.2	Experimentos realizados……	32
3.2.1	Medición de ganancia de las antenas…….	37
3.2.2	Diseño de experimentos……	43
3.2.3	Atenuación de onda en algunos medios…….	46
3.3	Simulaciones……	57
3.3.1	Simulaciones de las parámetros de la antena……...	58

3.3.2 Atenuación mediante el software CST Microwave Studio…… 62

4. ANÁLISIS Y RESULTADOS……. 66

5. CONCLUSIONES……... 71

6. RECOMENDACIONES…….. 73

CITAS……. 74

BIBLIOGRAFÍA……. 77

ANEXOS…… 78

LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 1. Representación gráfica de algunos puntos de evaluación en un rango de distancia según el modelo de propagación de onda en el agua……. 30

Figura 2. Representación gráfica de algunos puntos de evaluación en un rango de distancia según el modelo de propagación de onda en el lodo base agua con bentonita…….. 32

Figura 3. Tanque para mediciones de experimentos……... 33

Figura 4. Vista superior del modelo físico…….. 33

Figura 5. Vista frontal del modelo físico……. 34

Figura 6. Preparación del lodo base agua con bentonita…… 36

Figura 7. Lodo base agua con bentonita luego de haber reposado durante 16 horas……. 37

Figura 8. Antena parche rectangular…….. 38

Figura 9. Montaje de medición de ganancia de la antena (Primer método)……. 40

Figura 10. Modo de entrega de resultados del analizador de espectro…….. 40

Figura 11. Potencia recibida de la antena (Primer método de medición de ganancia) …….. 41

Figura 12. Montaje de medición de ganancia de la antena (Segundo método)…. 41

Figura 13. Parámetro S_{21} en un rango de frecuencia (Segundo método de medición de ganancia) ……... 42

Figura 14. Representación gráfica de la distribución F de Fisher del experimento……... 46

Figura 15. Potencia de transmisión del generador de señales……. 47

Figura 16. Modelo físico representativo para la realización de pruebas en agua. 48

Figura 17. Atenuación de onda en el agua…….. 48
Figura 18. Atenuación de onda en el agua (datos promedio)……... 50
Figura 19. Comparación de atenuación de onda de las diferentes concentraciones de salinidad y agua sin sal……. 52
Figura 20. Composición de sal marina……. 53
Figura 21. Modelo físico representativo para la realización de pruebas en lodo base agua con bentonita……. 53
Figura 22. Atenuación en el lodo base agua con bentonita de todas las réplicas. 54
Figura 23. Atenuación en el lodo base agua con bentonita con datos promedio.. 57
Figura 24. Representación gráfica antena parche…….. 60
Figura 25. Propagación de la antena…… 61
Figura 26. Diagrama de radiación de la antena…….. 62
Figura 27. Semejanza a las pruebas reales en el tanque con el par de antenas.. 63
Figura 28. Parámetros "S_{12} en cada posición en un rango de frecuencia……... 63
Figura 29. Atenuación de onda con datos obtenidos en CST en agua…….. 65
Figura 30. Atenuación de onda con datos obtenidos en CST en lodo base agua con bentonita……... 66
Figura 31. Comparación de atenuación de onda del modelo analítico, numérico y resultados experimentales en el lodo base agua con bentonita……... 70
Figura 32. Esquema de un diagrama de cajas…… 81
Figura 33. Registro de datos el software estadístico…….. 84
Figura 34. Programación de variables para el diseño de experimentos……. 85
Figura 35. ANOVA de un factor en SPSS…… 85
Figura 36. Definición variables dependientes e independientes en SPSS……. 86
Figura 37. Media de la intensidad de señal en un rango de distancia……. 89
Figura 38. Diagrama de cajas (Intensidad de señal Vs Distancia)…….. 89

LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 1. Dimensiones del tanque……... 34

Tabla 2. Datos y resultados de los dos métodos de medición de ganancia… 43

Tabla 3. Resultados obtenidos en SPSS para el análisis de varianza…… 45

Tabla 4. Intensidad de señal de la primera prueba en agua…… 49

Tabla 5. Intensidad de señal de la segunda prueba en agua…… 49

Tabla 6. Intensidad de señal promedio de las dos pruebas realizadas en agua 50

Tabla 7. Intensidad de señal de la primera réplica en lodo base agua con bentonita……... 54

Tabla 8. Intensidad de señal de la segunda réplica en lodo base agua con bentonita……. 55

Tabla 9. Intensidad de señal de la tercera réplica en lodo base agua con bentonita……. 55

Tabla 10. Intensidad de señal de la cuarta réplica en lodo base agua con bentonita……. 56

Tabla 11. Intensidad de señal de la quinta réplica en lodo base agua con bentonita……. 56

Tabla 12. Ventajas y desventajas de la antena parche……. 59

Tabla 13. Dimensiones y parámetros de la antena……. 60

Tabla 14. Datos de constante de atenuación de onda en el agua y lodo base agua con bentonita……... 66

Tabla 15. Comparación de datos teóricos de potencia en agua y lodo base agua con bentonita……... 67

Tabla 16. Comparación de datos experimentales de potencia en agua y lodo base agua con bentonita……..……... 68
Tabla 17. Comparación de datos simulados de potencia en agua y lodo base agua con bentonita……... 69
Tabla 18. Datos obtenidos del experimento con lodo base agua con bentonita.. 82
Tabla 19. Resultados obtenidos del software estadístico……. 87
Tabla 20. Tabla de análisis de varianza para el modelo con un solo factor y efectos fijos…… 90

LISTA DE ANEXOS

Pág.

Anexo A. Parámetros de las antenas…….. 78

Anexo B. Conceptos básicos relacionados al diseño de experimentos…… 80

Anexo C. Diseño de experimentos en SPSS……. 82

RESUMEN

TITULO: ESTUDIO DE LA PROPAGACIÓN DE ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS EN UN MEDIO CONFORMADO POR LODOS A BASE DE AGUA PARA APLICACIONES EN EL SECTOR PETROLERO[*]

AUTORES: Camila Mendoza Herrera, Wilmar Leonardo Jerez Díaz[**]

PALABRAS CLAVE: Modelos de propagación de onda EM, atenuación de onda, lodo base agua con bentonita, sensores inalámbricos, antena parche.

DESCRIPCIÓN:

El presente proyecto describe el mecanismo y utilidad del estudio de la propagación de ondas electromagnéticas en un medio conformado por lodos a base de agua con bentonita. Para tal efecto, se realizó una búsqueda de modelos y experimentos que registrasen el comportamiento de las ondas electromagnéticas en diferentes medios, llegando a la selección de dos modelos, el primero de tipo analítico conformado por parámetros electromagnéticos del medio en estudio, que se reprodujeron de forma experimental siguiendo las pautas de proyectos realizados anteriormente y el segundo de tipo numérico realizado a partir de un software que permitió prever la propagación de ondas electromagnéticas en el lodo base agua con bentonita.

Adicionalmente se relata el número y tipo de experimentos que fueron necesarios para ajustar el modelo analítico a una frecuencia de 2.45 GHz, como es el caso del método de medición de ganancia de la antena tipo parche. Para tal efecto, se requirió una búsqueda sistemática de artículos relacionados con los diversos conceptos que versan sobre el tema.

Ahora bien, se realizó una comparación entre el modelo analítico, numérico y los experimentos principalmente del parámetro de atenuación de onda EM. Los resultados permitieron reconocer factores significativos al momento del proceso de medición, en el cual variaba el resultado según el tiempo de reposo del líquido. Por otro lado, se debe tener en cuenta la posible interferencia electromagnética causada al realizar las mediciones debido a la frecuencia de trabajo utilizada.

Finalmente, cada modelo propuesto se utiliza con el fin de corroborar la concordancia entre los mencionados anteriormente, y de esta manera determinar un rango de distancia en el cual se puede establecer comunicación entre las antenas tipo parche.

[*] Trabajo de grado

[**] Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: PhD. Ernesto Aguilera Bermúdez.

ABSTRACT

TITLE: AN STUDY OF ELECTROMAGNETIC WAVES PROPAGATION IN A MEDIUM CONSISTING OF WATER BASE SLUDGE FOR APPLICATIONS IN THE OIL SECTOR*

AUTHORS: Camila Mendoza Herrera, Wilmar Leonardo Jerez Díaz**

KEYWORDS: EM wave propagation models, wave attenuation, water base sludge with bentonite, wireless sensors, microstrip patch antenna.

DESCRIPTION:
This project describes the mechanism and usefulness of the study of propagation of electromagnetic waves in a sludge formed by water-based bentonite medium. To this end, a search for models and experiments asked to record the behavior of electromagnetic waves in different ways, leading to the selection of two models, made the first of analytic comprised of electromagnetic parameters of the medium under study, which were reproduced experimentally along the lines of projects previously undertaken and the second numeric type made from a software that allowed us to foresee the propagation of electromagnetic waves in water base sludge with bentonite.

Additionally, the number and type of experiments were needed to implement the analytical model at a frequency of 2.45 GHz, such as the method of measuring the antenna gain is related. For this purpose, it was required a systematic search related to the various concepts that deal with the subject items.

A comparison between the analytical, numerical model and experiments was performed according to the EM wave attenuation parameter. The results led to recognize some significant factors at the time of measurement process in which these results varied according to the repose time of the fluid. On the other hand, it must be considered the possible electromagnetic interference to make the measurements due to the working frequency used.

Finally, each proposed model is used to confirm the correlation between those mentioned above, and thus determine a distance range in which a communication can be established between the microstrip patch antennas.

* Work Degree

** Faculty of Physical Mechanical Engineering. School of Electric, Electronic and Telecommunications. Project Director: PhD. Ernesto Aguilera Bermúdez

INTRODUCCIÓN

La industria del petróleo es uno de los principales emporios que estimula el campo de la investigación. Este preciado oro negro, como muchas veces se le denomina al sector de hidrocarburos, impulsa el desarrollo de nuevos productos, servicios e insumos que sean de gran utilidad en diversos campos como el de las industrias manufactureras y el sector de alimentos.

Sin embargo en la consecución del culmen de esta empresa, se enfrentan diversos desafíos susceptibles de destacar en el marco de esta investigación. Por ejemplo, durante el proceso de exploración, la dificultad de establecer la ubicación de los pozos implica, a veces, esfuerzos infructuosos, desperdicio de recursos y tiempo. Por otro lado, en los procesos de perforación, se presentan inconvenientes en el manejo de la estabilidad de los pozos, motivo que justifica esta investigación en el seno de la Universidad Industrial de Santander, específicamente bajo el amparo del Grupo de Investigación RadioGIS, adscrito a la Escuela De Ingenierías Eléctrica, Electrónica Y De Telecomunicaciones, (E^3T), quien ha cobijado proyectos basados en el uso de redes de sensores durante el proceso de perforación, con el fin de monitorear la forma y los cambios de los pozos, para preveer complicaciones tales como colapsos en el pozo, pegas de tubería, derrumbamientos, pérdidas de lodo, entre otros.

Se destacan principalmente dos estudios, siendo el primero un proyecto realizado por la Maestría en Ingeniería Electrónica de la Universidad Industrial de Santander denominado ***Evaluación de la viabilidad técnica de implementar soluciones de "Sensit" en la perforación petrolera, a partir de un análisis de las cualidades de propagación de las ondas en lodos base agua****,* tesis del Ing. Msc. Sergio Andrés Muñoz Sarmiento, cuyo objetivo era el trabajo experimental con par de sensores “SensIT” bajo el estándar IEEE 802.15.4 dentro de un lodo base agua (implementados actualmente en la industria en Colombia) a una frecuencia de 2.4GHz con el fin de demostrar la aplicabilidad de esta tecnología en la perforación petrolera.

La otra investigación denominada ***Determinación experimental de la permitividad dieléctrica del lodo de perforación base agua a 2,4 GHZ enfocado a aplicaciones sensIT*** fue realizada por la Ingeniera de Petróleos Lina Margarita Gómez Ramírez y el Ingeniero Electrónico Jorge Armando Anaya***.*** Este proyecto pretendía medir experimentalmente la permitividad del lodo de perforación con el fin de establecer el comportamiento de las ondas electromagnéticas en este medio en miras a desarrollar una nueva tecnología que garantice la estabilidad de los pozos petroleros utilizando la interconexión de sensores inalámbricos.

Es así como la presente investigación denominada "*Estudio de la propagación de ondas electromagnéticas en un medio conformado por lodos a base de agua para aplicaciones en el sector petrolero"* se centra en la determinación del comportamiento de la propagación de ondas electromagnéticas en un medio conformado por lodos base agua con bentonita para la implementación de un sistema de comunicación en el mismo, con el fin de conocer el comportamiento de las ondas electromagnéticas, destacando el uso de bentonita como elemento experimental básico para la realización de lodos, debido a que este componente químico es utilizado como aditivo para el lodo de perforación y en la industria de los fluidos de perforación, es usado para proporcionar viscosidad, estructura de gel y control del filtrado.

El presente libro se distribuirá en cinco capítulos. El primer capítulo presentará el objetivo general y los objetivos específicos. El marco teórico-referencial que orientó esta investigación se describirá en el segundo capítulo, destacando en este capítulo, la teoría de propagación de ondas electromagnéticas y sus componentes, los cuales se articulan con una caracterización, tipologías y mecanismo de medición antenas. En el tercer capítulo se presentan los resultados de los experimentos realizados, la implementación de un modelamiento analítico y numérico además del análisis y la comparación de cada uno de ellos. Finalmente, los capítulos cuarto y quinto presentan las conclusiones y recomendaciones pertinentes del trabajo.

1. OBJETIVOS

1.1 Objetivo general

Determinar el comportamiento de la propagación de ondas electromagnéticas en un medio conformado por lodos a base de agua para estudios de la implementación de un sistema de comunicación en dicho medio.

1.2 Objetivos específicos

1. Realizar el modelado y simulación numérica de la propagación de las ondas electromagnéticas en el lodo a base de agua, a partir del conocimiento de los parámetros electromagnéticos que caracterizan dicho medio.

2. Corroborar los resultados numéricos obtenidos anteriormente mediante una solución encontrada que tenga modelo analítico.

3. Comparar los resultados numéricos y analíticos de atenuación de onda con las medidas que han sido adquiridas previamente en un conjunto de experimentos que involucran la comunicación inalámbrica de sensores en dicho medio.

2. MARCO TEÓRICO

Las ondas electromagnéticas (EM) se definen como un tipo radiación en forma de onda y están conformadas por un campo eléctrico y otro magnético, los cuales oscilan perpendicularmente entre sí, teniendo como característica la posibilidad de viajar en el vacío. Estas ondas tienen aplicaciones importantes en las comunicaciones como son las ondas de radio, una cualidad importante es que estas se pueden propagar a través de cualquier material dieléctrico, en el caso de esta investigación la propagación es a través del lodo de perforación, cabe aclarar que en medios con pérdidas la propagación no es tan eficiente ya que los campos eléctricos hacen que fluyan corrientes en el material, que disipan con rapidez la energía de las ondas. [1]

2.1 Ecuaciones de Maxwell

Las ecuaciones de Maxwell describen la evolución en el tiempo y en el espacio de los campos magnéticos **B** y eléctricos **E**. Los diferentes problemas se especifican con distintas condiciones de borde que describen situaciones físicas como la posición de los conductores en donde se confinan o reflejan los campos.

En un medio isotrópico las Ecuaciones de Maxwell son las siguientes [2]:

$$\nabla x\vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad Ampere \tag{1}$$

$$\nabla x\vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad Faraday \tag{2}$$

$$\nabla \cdot \vec{\mathrm{B}} = 0 \tag{3}$$

$$\nabla \cdot \overline{D} = \rho \tag{4}$$

Donde

$\vec{H}$: Intensidad de campo magnético [A/m]

$\vec{B}$: Densidad de flujo magnético [Wb/m^2] ó [T]

$\vec{D}$: Densidad de flujo eléctrico [C/m^2]

$\vec{J}$: Densidad de corriente eléctrica [A/m^2]

$\vec{E}$: Intensidad de campo eléctrico [V/m]

2.2 Ondas electromagnéticas planas

Una onda plana es una solución particular de las ecuaciones de Maxwell teniendo **E** en la misma dirección, magnitud y fase en planos infinitos perpendiculares a la dirección de propagación (lo mismo para **H**). De manera estricta una onda plana uniforme no existe en la práctica, ya que para crearla se requeriría una fuente de extensión infinita. Sin embargo, si estamos lo suficientemente alejados de la fuente, el frente de onda será casi esférico y una porción muy pequeña de una esfera gigante es casi un plano [3].

Para obtener una descripción del comportamiento de onda se puede recurrir a la ecuación vectorial homogénea de Helmholtz

$$\nabla^2 E + k^2 E = 0 \tag{5}$$

Es **k** el número de onda y se expresa como:

$$k = \omega\sqrt{\mu\varepsilon} = \frac{\omega}{u_p} \tag{6}$$

Donde u_p es la velocidad de propagación de la onda en el medio con características electromagnéticas tales como la permeabilidad magnética μ y permitividad dieléctrica ε.

En casos donde el medio es conductor con pérdidas, se genera un flujo de corriente de cargas libres por la presencia de un campo eléctrico, por lo cual es necesario expresar las ecuaciones de la siguiente forma:

$$\nabla xH = (\sigma + j\omega e)E = j\omega\left(\varepsilon + \frac{\sigma}{j\omega}\right)E = j\omega\varepsilon_c E \tag{7}$$

Con

$$\varepsilon_c = \varepsilon - j\frac{\sigma}{\omega} \quad [\frac{F}{m}] \tag{8}$$

También se genera un movimiento de cargas ligadas, las cuales producen una densidad de volumen de corrientes de polarización, que cambia con la misma frecuencia que el campo eléctrico aplicado. Al realizarse un incremento en la frecuencia, tiende a evitarse que el desplazamiento de partículas quede en fase con las variaciones del campo debido a la inercia de las partículas cargadas. Estas generan mecanismos de amortiguamiento de vibraciones los cuales ocasionan pérdidas en la potencia debido al trabajo requerido para sobrepasar las fuerzas de amortiguamiento [3-6].

Cuando la polarización se encuentra fuera de fase, se caracteriza por una susceptibilidad eléctrica complejo y por ende una permitividad compleja la cual se representa como:

$$\varepsilon_c = \varepsilon - j\frac{\sigma}{\omega} \quad [\frac{F}{m}] \tag{9}$$

ε' y ε'' son funciones de la frecuencia, además se puede encontrar una conductividad equivalente:

$$\sigma = \omega\varepsilon'' \quad [\frac{S}{m}] \tag{10}$$

La tangente de pérdidas es la que describir la medida de la pérdida de potencia en el medio la cual se puede calcular a través de:

$$\tan\delta_c = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \cong \frac{\sigma}{\omega\varepsilon} \tag{11}$$

Donde δ es conocido como ángulo de pérdidas.

Un dieléctrico que presenta pérdidas mínimas se puede comportar como un buen aíslate pero imperfecto, con una conductividad diferente de 0. La constante de propagación de un dieléctrico con pérdidas se puede expresar como [3]:

$$\gamma = \alpha + j\beta \cong j\omega\sqrt{\mu\varepsilon'}\left[1 - j\frac{\varepsilon''}{2\varepsilon'} + \frac{1}{8}\left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}\right)^2\right] \tag{12}$$

Y de esta manera se puede obtener la constante de atenuación:

$$\alpha = \Re\varepsilon(\gamma) \cong \frac{\omega\varepsilon''}{2}\sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon'}} \quad [\frac{Np}{m}] \tag{13}$$

La impedancia intrínseca de un dieléctrico con pérdidas es la razón de **Ex** y **Hy** de una onda plana uniforme, ya que la intensidad de un campo eléctrico y la intensidad de un campo magnético en un dieléctrico que presenta pérdidas no están en fase temporal y se describe como:

$$n_c = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon'}}\left(1 - j\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}\right)^{-1/2} \cong \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon'}}\left(1 + j\frac{\varepsilon''}{2\varepsilon'}\right) \quad [\Omega] \tag{14}$$

Un aspecto importante a tener en cuenta es el comportamiento de los materiales buenos conductores, los cuales se pueden describir a través de la ecuación:

$$\gamma = \alpha + j\beta \cong (1 + j) \cong (1 + j)\sqrt{\pi f \mu \sigma} \tag{15}$$

En un buen conductor

$$\alpha = \beta = \sqrt{\pi f \mu \sigma} \tag{16}$$

Donde α y β aumentan con la raíz de f y σ.

La profundidad de penetración de onda plana EM un conductor es la distancia a la cual la amplitud de una onda plana viajera se minimiza a un factor de e^{-1}, y se describe a través de:

$$\delta = \frac{1}{\alpha} = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \, [m] \tag{17}$$

2.3 Modelo analítico de propagación

La pérdida de potencia en un ambiente se da por la probabilidad de que una señal emitida llegue o no a un lugar de recepción; para tal efecto existen modelos de propagación que predicen dicho comportamiento.

Existen modelos que se fundamentan en mediciones realizadas en algún entorno de interés y muchos de ellos pueden ser utilizados para construir, por lo que no se puede aislar la teoría matemática de la información que se obtiene de forma estadística según el medio de interés que se requiere.

Para desarrollar un modelo que se acerque al comportamiento de la atenuación de ondas electromagnéticas en un medio como lo es el agua, lodo base agua bentonita y aire, es necesario realizar una combinación entre la constante de propagación y la formula de transmisión de Friis. [7]

2.3.1 Fórmula de transmisión de Friis. Una de las ecuaciones primordiales en la teoría de las antenas se define como la fórmula de transmisión de Friis, llamada así debido al señor Harald T. Friis. Dicha fórmula calcula la potencia que recibe una antena con ganancia G_R, de otra antena con ganancia G_T a cierta distancia y frecuencia f para una onda EM.

Suponiendo que la antena sea isotrópica, la ecuación resultante es la fórmula de transmisión de Fris como se muestra a continuación

$$P_R = PLF\ \frac{P_T}{4\pi R^2} G_T A_e = PLF \frac{P_T G_T G_R \lambda^2}{(4\pi R)^2} \tag{18}$$

En el caso de que la dirección de polarización sea distinta entre las antenas transmisoras y receptoras, la ecuación 18 debe considerar el factor PLF. De caso contrario dicho factor es igual a 1.

Donde

$$PLF = cos^2\varphi \tag{19}$$

2.3.2 Constante de propagación. La fórmula de transmisión de Friis es utilizada en entorno ideal como el aire sin una atenuación significante, pero al momento de considerar otro medio con mayor atenuación como el agua, aceite, lodo, etc, no es suficiente utilizar dicha fórmula y para ello se debe adicionar otra teniendo en cuenta las propiedades del medio (conductividad, permeabilidad y permeabilidad), atenuación y absorción, la cual puede ser expresada por la constante de propagación.

Ya que podemos enunciar la potencia recibida de las ondas electromagnéticas (P_R) en términos de la potencia de transmisión de las ondas electromagnéticas (P_T), la distancia de separación (R) y la constante de propagación (γ), se tiene que:

$$P_R = P_T e^{-2\gamma R} \tag{20}$$

En donde la constante de propagación γ se da por la siguiente expresión:

$$\gamma = \alpha + j\beta \tag{21}$$

Siendo α la constante de atenuación y β la constante de fase.

$$\alpha = \omega\sqrt{\varepsilon\mu}\sqrt{\frac{1}{2}\left[\sqrt{1+\frac{\sigma^2}{\omega^2\varepsilon^2}}-1\right]} \tag{22}$$

$$\beta = \omega\sqrt{\varepsilon\mu}\sqrt{\frac{1}{2}\left[\sqrt{1+\frac{\sigma^2}{\omega^2\varepsilon^2}}+1\right]} \tag{23}$$

Ya que nuestro interés es estudiar la constante de atenuación, utilizaremos dicha constante para obtener y estimar la atenuación de potencia de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$P_R = P_T e^{-2R\alpha}\,[mW] \tag{24}$$

2.3.3 Modelo de propagación de onda. Con el fin de obtener un valor de intensidad de señal recibida, se deben tener en cuenta algunos aspectos importantes tanto de la antena como de las propiedades del medio para poder definir un modelo que nos acerque al comportamiento de propagación de la onda electromagnética en medios con pérdidas como el agua y lodo base agua con bentonita.

Ahora bien, reemplazando la ecuación 18 en la ecuación 24, podemos adquirir una estimación de la ecuación que nos permitirá obtener el comportamiento de las ondas electromagnéticas a partir de la potencia de transmisión, propiedades de las ondas electromagnéticas y del medio a estudiar [7].

Por lo tanto, tenemos que:

$$P_R = PLF\ \frac{P_T}{4\pi R^2} G_T A_e e^{-2R\alpha}\ [mW] \tag{25}$$

Realizando una transformación de unidades a dB, debemos tomar la escala logarítmica a ambos lados de la ecuación como se muestra a continuación:

$$10log_{10}P_R = 10log_{10}PLF + 10log_{10}P_T + 10log_{10}G_T - 10log_{10}4\pi R^2 + 10log_{10}A_e - 20R\alpha log_{10} - 20R\alpha log_{10}e \qquad [dB] \tag{26}$$

Definiendo unas nuevas constantes para la simplificación de la ecuación, tenemos que:

$$S_R - S_T = -20log_{10}R - 20R\alpha log_{10}e + \Gamma \qquad [dB] \tag{27}$$

Donde

$$S_R = 10log_{10}P_R \tag{28}$$

y

$$S_T = 10log_{10}P_T \tag{29}$$

La constante Γ corresponde a los valores que no se encuentran en función de la distancia R, como se muestra a continuación:

$$\Gamma = 10log_{10}PLF - 10log_{10}4\pi + +10log_{10}G_T + 10log_{10}A_e\ [dB] \tag{30}$$

Si suponemos que las antenas son isotrópicas y que el factor de pérdida de polarización PLF es igual a 1, se sustituye la apertura efectiva en la ecuación 30, como se evidencia a continuación:

$$\Gamma = 20log_{10}\frac{\lambda}{4\pi} + 10log_{10}G_T + 10log_{10}G_R \quad [dB] \tag{31}$$

Por último, se concluye que el modelo analítico que se utilizará para el estudio del comportamiento de la propagación de las ondas electromagnéticas en medios como el agua, aire y lodo base agua con bentonita, es el que se expresa por medio de la ecuación 27.

2.4 Antenas

Las antenas son de gran demanda en campos de desarrollo tecnológico, que se adecuan según su utilidad, teniendo como objetivo fundamental ser elementos pasivos que concentran la señal en una cierta dirección, sin amplificar la señal de propagación. Las antenas parche se usan con mayor frecuencia en la industria de las comunicaciones móviles o inalámbricas cuya fabricación se ve fortalecida a partir de nuevos materiales y cambios estructurales lo que permite su reproducción a gran escala con circuitos impresos.

2.4.1 Medición de ganancia. La característica más importante que describe el comportamiento de una antena es la ganancia. Esta, juega un papel muy importante en el comportamiento de la señal emitida o recibida. Es necesario conocerla con exactitud, para poder determinar el nivel de intensidad recibido por un receptor o el nivel de intensidad emitido por un transmisor [8].

Hay varias técnicas para poder determinar la ganancia absoluta de una antena, todas ellas se basan en la formula de transmisión de Friis, como lo es el método de dos antenas. Para realizar la medida, debemos suponer que las antenas deben estar separadas una distancia mayor a la requerida para operar en el campo lejano, deben estar alineadas en la dirección de máxima radiación, debe existir adaptación de polarización y tanto la distancia entre ellas como la frecuencia de trabajo son datos conocidos [9].

Ahora bien, al tomar una relación entre dos antenas la ecuación de transmisión de Friis se define como la ecuación 18 mencionada anteriormente siendo PLF=1, se tiene que:

$$P_R = \frac{P_T G_T G_R \lambda^2}{(4\pi R)^2} \quad (32)$$

Por tanto, si las dos antenas son exactamente iguales, en la ecuación anterior solo habrá una incógnita, la ganancia, ya que los demás datos se pueden medir o son conocidos.

Más adelante en la sección 3.2.1 se explicará el procedimiento de cómo realizar la medición de ganancia para las dos antenas, ya que este dato será necesario para la implementación del modelo analítico de propagación de onda en los diferentes medios como los son agua, aire y lodo base agua con bentonita.

3. CARACTERIZACIÓN DEL MEDIO

3.1 Implementación del modelo analítico de propagación

De acuerdo con la sección 2.3 que explica el modelo analítico de propagación, se tomaron como referencia los parámetros electromagnéticos del agua y del lodo base agua con bentonita para el desarrollo de su correspondiente modelo.

En primera instancia, se desarrolla dicho modelo para el agua.

Los parámetros electromagnéticos son: [4]

$\sigma = 1.3386\ S/m$

$\mu = 1.2566\ \mu H/m$

$\varepsilon = 6.82726 * 10^{-10}\ F/m$

Reemplazando los parámetros electromagnéticos en la ecuación 22, se obtiene que:

$$\alpha = 28.6566 \text{ Np/m}$$

Debido a que es necesario hallar el valor de Γ según la ecuación 31, se debe tener en cuenta el resultado obtenido de la ganancia de la antena parche transmisora y receptora detallado en la sección 3.2.1 y el valor de λ. Por lo tanto, se tiene que:

$$G_R = G_T = 3.38\, dB$$

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 * 10^8}{2.45 * 10^9} = 0.1244\, m$$

Por consiguiente, se tiene que Γ igual a -29.6468 dB.

Con el fin de obtener el modelo que nos define la propagación en el agua, se realiza una compensación de la diferencia entre el valor de la intensidad de señal de onda EM y el modelo en la distancia de referencia, es decir, 12 cm como se explica en la sección 3.2.3. Por lo tanto, el valor de gamma compensado es -48.3424 dB.

De esta manera, el modelo que nos especifica la propagación de onda en el agua es el siguiente:

$$S_R - S_T = -20 \log R - 248.908R - 48.3424 \quad [dB] \tag{33}$$

La Figura 1 representa algunos puntos dentro de un rango determinado de distancia que se ajustan a la ecuación 33 con el fin de realizar comparaciones con los datos obtenidos experimentalmente, en donde S_R-S_T se define como la Potencia.

Se comprueba por medio de la ecuación 27, despejando la constante α, que dicho valor es igual a 28.6 Np/m, valor que concuerda con el hallado mediante la ecuación 22.

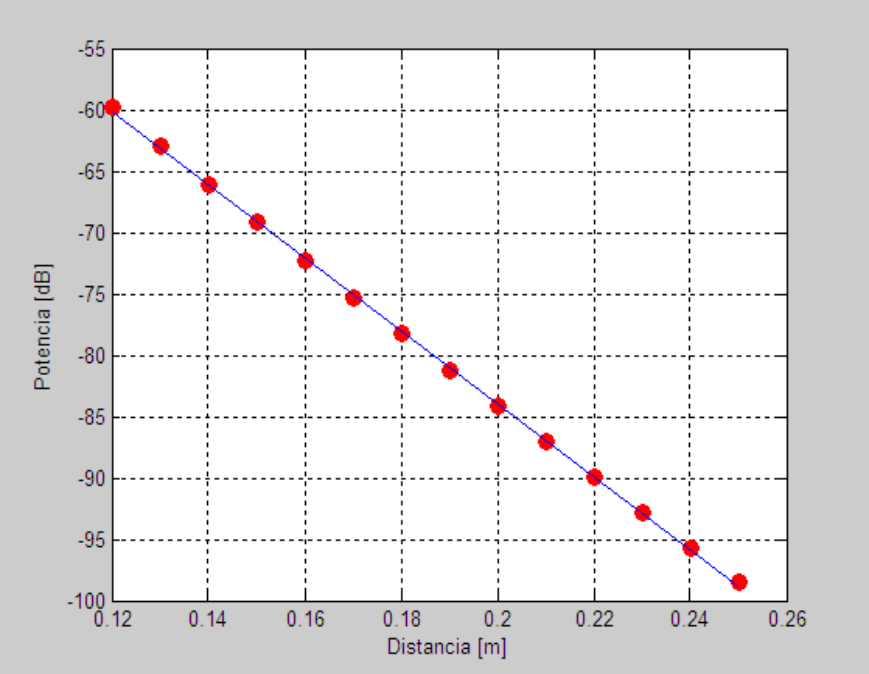
A continuación, se efectúa el mismo procedimiento de la implementación del modelo analítico para el agua, tomando los parámetros electromagnéticos del lodo base agua con bentonita [4-5]

$\varepsilon = 6.48470983 * 10^{-10} F/m$

$\sigma = 1.3934\ S/m$

$\mu = 1.2566\ \mu H/m$

Figura 1. Representación gráfica de algunos puntos de evaluación en un rango de distancia según el modelo de propagación de onda en el agua



Reemplazando los parámetros electromagnéticos del medio en la ecuación 22, se obtiene que:

$\alpha = 30.597\ \ \mathrm{Np/m}$

Se tiene que el valor de Γ es de -29.6468 dB según la ecuación 31 reemplazando los mismos valores de ganancia de la antena parche transmisora y receptora utilizados para la implementación del modelo analítico del agua.

Para definir el modelo de propagación en el lodo base agua con bentonita, se realiza una compensación de la diferencia entre el valor de la intensidad de señal de onda EM y del modelo en la distancia de referencia, es decir, 12 cm como se explica en la sección 3.2.3, obteniendo un valor de gamma compensado igual a -45.5259 dB.

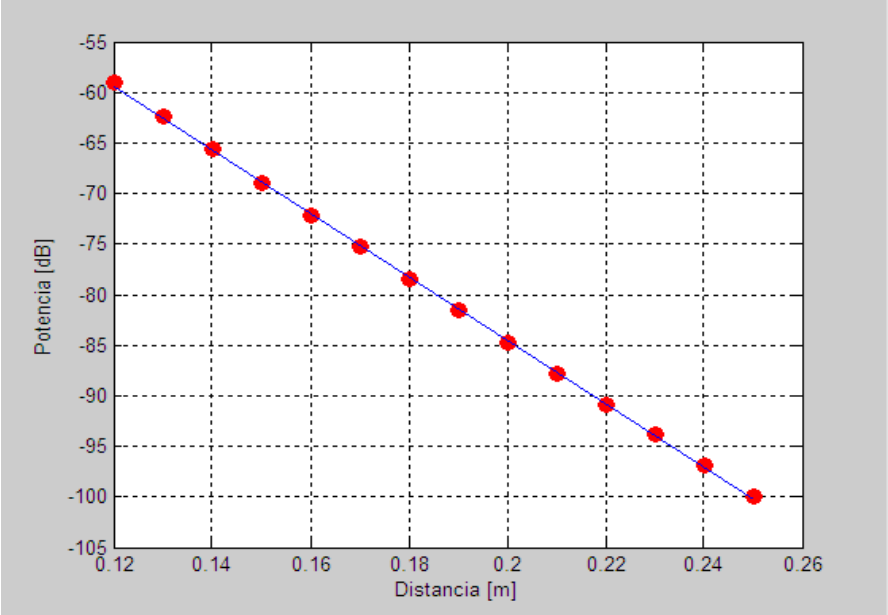
Por consiguiente, el modelo que nos especifica la propagación en el lodo base agua con bentonita según la ecuación 27 es el siguiente:

$$S_R - S_T = -20\log R - 265.762R - 45.5259 \quad [dB] \tag{34}$$

La Figura 2 representa algunos puntos dentro de un rango determinado de distancia que se ajustan a la ecuación 34 con el fin de realizar comparaciones con los datos obtenidos experimentalmente, en donde S_R-S_T se define como la Potencia.

Se comprueba por medio de la ecuación 27, despejando la constante α que dicho valor es igual a 30.5 Np/m, valor que concuerda con el hallado mediante la ecuación 22.

Figura 2. Representación gráfica de algunos puntos de evaluación en un rango de distancia según el modelo de propagación de onda en el lodo base agua con bentonita



3.2 Experimentos realizados

Con el propósito de conocer el comportamiento de la onda (nivel de atenuación) dentro del lodo, se realizan una serie de experimentos, donde para aplicar una potencia de transmisión, se utiliza un tanque adecuado a las necesidades espaciales de la medición (Figura 3) con el fin de distanciar las antenas dentro de un volumen de agua y así minimizar los efectos de multi-trayectoria y de ruido [10]. No obstante, se presenta dificultad en la obtención y preparación de los volúmenes de lodo adecuados para experimento debido a que la cantidad de material requerido del soluto (bentonita) lidia con la escasez y costos de obtención de este compuesto en el mercado. Asimismo se presentan dificultades en la accesibilidad de equipos que permitan su correcta mezcla y homogenización.

De tal forma, se grafica el modelo físico ideal, en el que deberán ser sumergidas las antenas parche para realizar las pruebas, teniendo en cuenta el diseño formal de experimentación (Figura 4 y 5).

Figura 3. Tanque para mediciones de experimentos

Figura 4. Vista superior del modelo físico

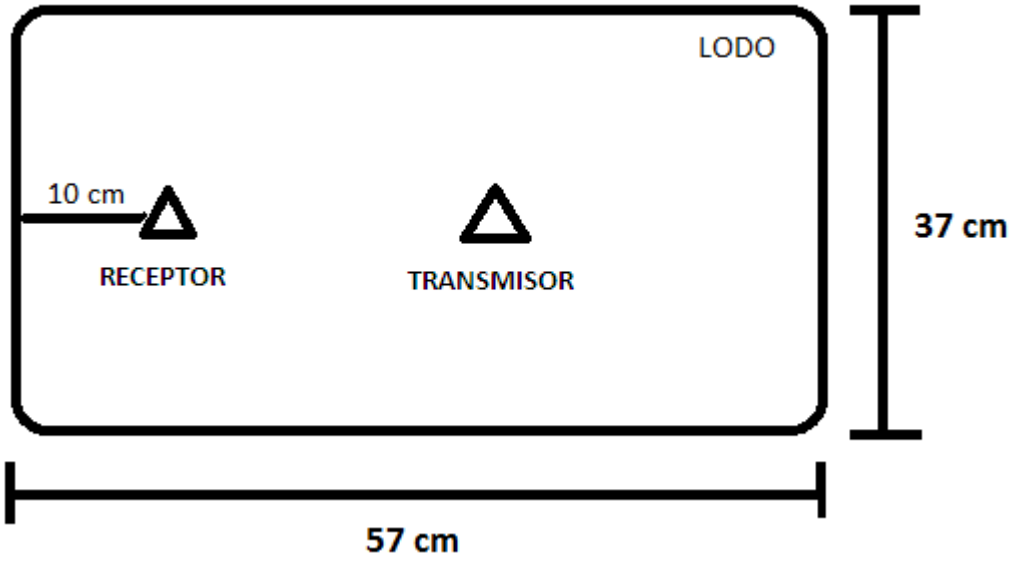
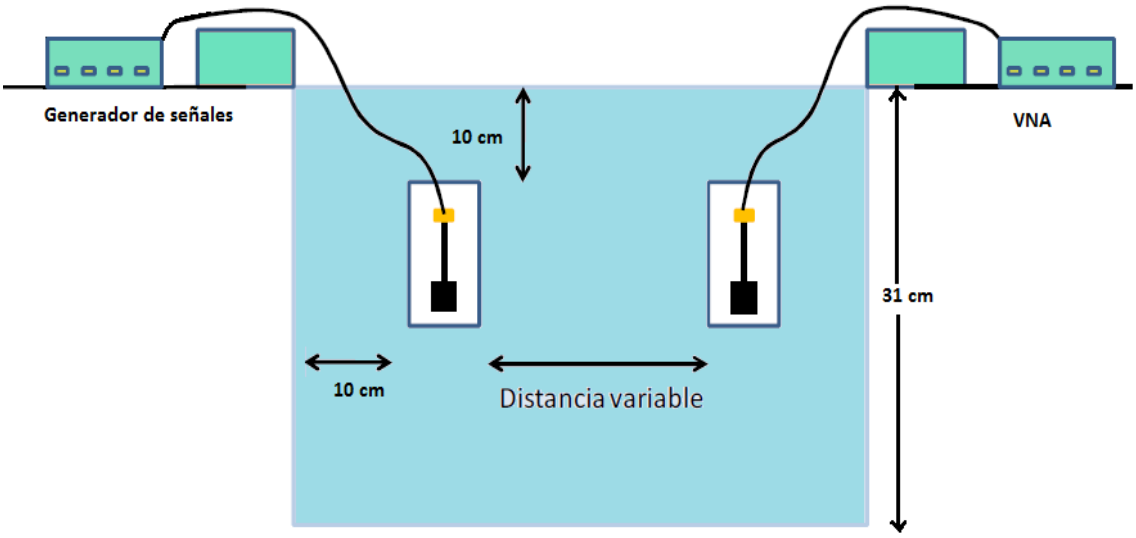


Figura 5. Vista frontal del modelo físico



Se realizaron pruebas en tres medios, agua, agua con sal y lodo base agua con bentonita y se monitorizó la atenuación de la onda propagada en el medio a medida que la antena transmisora se fue alejando de la receptora, obteniendo los datos de la potencia recibida. Este modelo representativo (Figura 5) del tanque con dimensiones de la Tabla 1 tiene la capacidad de acumular aproximadamente 70 litros de líquido donde se efectuaron las pruebas de los tres medios.

Tabla 1. Dimensiones del tanque

Dimensiones del tanque	
Profundidad	37 cm
Ancho	57 cm
Altura	31 cm

Por otro lado se utilizó el lodo base agua con bentonita como recurso alternativo ya que los otros componentes que se utilizan para formar un lodo base agua para perforación en la industria no son fáciles de adquirir en pequeñas cantidades y tienen un manejo delicado. El lodo base agua con

bentonita se considera como un componente importante en la formación de lodos de perforación más complejos, siendo la bentonita el ingrediente más importante dentro de esta mezcla, basándose en el aumento de la viscosidad del lodo siendo necesario dejarla en reposo en el agua por más de 16 horas con el fin de que se efectúe el proceso de hidratación de la misma.

Para la preparación de lodos base agua hay que tener en cuenta que las unidades que se utilizan en la industria son unidades inglesas, con concentraciones en Libras por barril (LPB), por lo que para este proyecto, se utilizó la siguiente conversión [5]:

$$1 \text{ LPB} = \ 1 \text{ gramo en } 350.05 \text{ ml} \tag{35}$$

A pesar del difícil acceso, se eligió una concentración de 12LPB de bentonita, ya que a concentraciones más altas era necesario hacer uso de una mayor proporción de este ingrediente. Por lo tanto, sabiendo la concentración y la cantidad de agua aproximada (70 litros) que se utilizaría, se obtuvo una cantidad de bentonita de la siguiente forma:

$$12\ LPB = 12\ gr \ \rightarrow \ 350.05\ ml$$

$$X \quad \rightarrow \ 70000\ ml$$

$$X \cong 2400\ gr$$

Se realizó un proceso de homogenización que consistió en combinar una sustancia hasta lograr una mezcla uniformemente consistente, teniendo en cuenta un concepto importante al momento de realizar cualquier medición, como lo es el romper geles, es decir que cuando el medio se deja en condiciones estáticas por cierto periodo de tiempo y sus propiedades tienden a aumentar, se debe romper la textura espesa que adquiere el lodo.

Para su preparación fue necesario el uso de un filtro de material de aluminio, de modo que al ir agregando bentonita a la mezcla no se formasen grumos, así como el uso de un taladro percutor que permitiese la mezcla del lodo como se puede observar en la Figura 6.

Figura 6. Preparación del lodo base agua con bentonita

Después de un periodo de reposo de 16 horas en el tanque de medición, para asegurar la hidratación, se utilizó de nuevo el taladro percutor con el fin de romper geles antes de realizar cualquier medición, como se puede observar en la Figura 7.

Dada la cantidad de lodo necesario y su dificultad de almacenamiento, se decide que para hacer el análisis de los experimentos de atenuación de onda, se realice un diseño de experimentos con la metodología lineal en el cual solo se utilizó un factor con varios niveles, permitiendo conocer la variación de la atenuación de la onda al cambiar la distancia entre las antenas. . (Ver Anexo C)

Se debe aclarar que las pruebas que se realizaron con agua también tuvieron como objetivo la comprobación del modelo analítico (ecuación 27) donde se confrontó la constante de atenuación hallada por este modelo con datos ya

reportados en otras investigaciones [4], ahondando sobre este análisis más adelante.

Figura 7. Lodo base agua con bentonita luego de haber reposado durante 16 horas

3.2.1 Medición de ganancia de las antenas. Conocer con exactitud la ganancia de las antenas es necesario para establecer el nivel recibido por un receptor o emitido por un transmisor. Para medir dicha ganancia, existen varias alternativas y configuraciones que se manejan y que dependen de la frecuencia de operación [8],[11], donde se tiene en cuenta los efectos de proximidad y multitrayectoria que son obstáculos en la medición. No obstante, para evitarlos, se utiliza la teoría de distancia de Fraunhofer que actúa de la misma forma que el campo lejano (far field), esto ocurre cuando los campos eléctricos y los campos magnéticos se encuentran en la misma fase y se relacionan mediante la impedancia característica del espacio libre [12].

Para la realización de los diferentes experimentos realizados, se hizo necesario la adquisición de unas antenas parche (Figura 8) obtenidas de un proyecto elaborado anteriormente a través del grupo de investigación RadioGis [13], las cuales están conectadas a una sonda SMA con una impedancia característica de 50Ω. Éstas sondas se encuentran enroscadas a una serie de convertidores

para poder adaptarse a las conexiones del VNA del cual existen pérdidas por el camino y pérdidas de propagación (P_p) en el medio definiéndose por la ecuación 36.

Figura 8. Antena parche rectangular

$$P_p = 20Log\left[\frac{\lambda}{4\pi D}\right][dB] \quad (36)$$

Estas antenas tuvieron el objetivo de resonar a una frecuencia especifica (2.45 GHz) entre otras funciones. Utilizando las especificaciones de las antenas, se pretende hallar la ganancia existente de ellas con el método de las dos antenas [8], asumiendo que las antenas deben ser idénticas para que sus ganancias sean las mismas, minimizando el proceso matemático al hallar su resultado y teniendo en cuenta que las antenas deben estar separadas a una distancia mayor a la requerida para operar en el campo lejano Ff, la cual se obtiene de:

$$F_f = \frac{2(Dmax)^2}{\lambda} \quad [m] \quad (37)$$

Donde Dmax es la dimensión más grande de la antena parche y λ es la longitud de onda λ=c/f siendo f=2.45 GHz

Reemplazando en la ecuación 37 se tiene que:

$$F_f = \frac{2(0.0572)^2}{0.1244} = 0.0534\ m = 5.3\ cm$$

Existen dos metodologías para la medición de ganancia de las antenas:

El primer método consiste en calibrar un generador de señales y un analizador de espectro, enviando desde el generador una portadora y de esta forma verificar en el analizador de espectro que se esté recibiendo dicha portadora. Luego se conecta una de las antenas al generador de señales y la otra al analizador de espectro.

Para realizar la medición se debe cumplir la teoría de Fraunhofer, es decir, que las antenas se encuentren separadas en este caso a una distancia mayor a 5.3 cm, deben estar de frente en línea recta, a una distancia fija (D=1m) y de esta forma obtenemos el valor de la potencia recibida en el analizador de espectro ya que con este dato, con el valor de las pérdidas de propagación y potencia de transmisión se utiliza la ecuación 38 para obtener la ganancia de la antena.

$$G_{ant} = \frac{P_r - P_t - P_p}{2}[dB] \quad (38)$$

En la Figura 9 se muestra en el montaje para realizar el procedimiento para hallar la ganancia donde se utilizan dos soportes iguales de maderas sujetas con prensa de mano y las antenas adheridas a los soportes a la misma altura.

Reemplazando los valores de D y λ en la ecuación 36, se obtiene un valor de pérdidas de propagación de -40.046dB y teniendo en cuenta que hay pérdidas en el cable de transmisión de 5dBm, se puede observar el dato requerido en el analizador de espectro como se muestra en la Figura 10.

Por medio del analizador de espectro se toman muestras de la potencia recibida de la antena y se grafican como se puede observar en la Figura 11.

Reemplazando en la ecuación 38 se tiene que la ganancia de las antenas es igual a 3.3895 dB.

Figura 9. Montaje de medición de ganancia de la antena (Primer método)

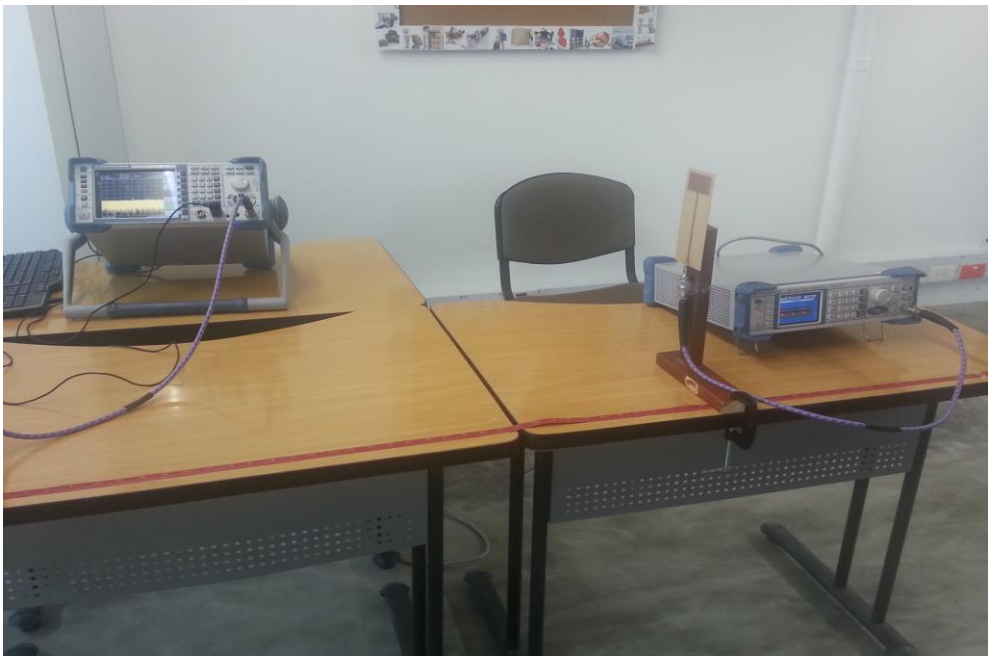


Figura 10. Modo de entrega de resultados del analizador de espectro

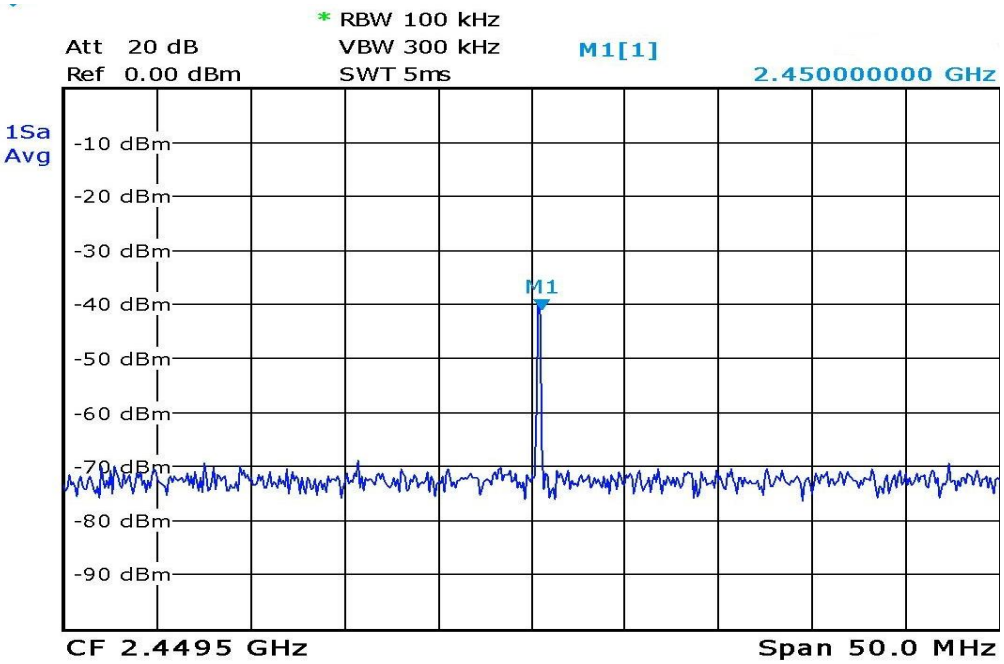
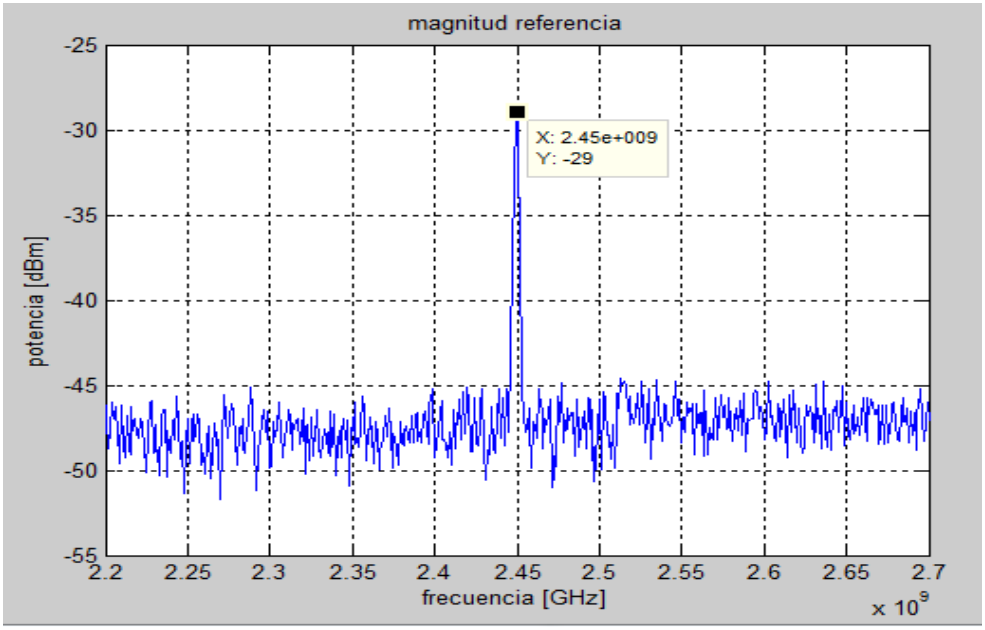


Figura 11.Potencia recibida de la antena (Primer método de medición de ganancia)



El segundo método consiste en utilizar solamente el analizador de redes. La medición se realiza igualmente a una distancia igual a 1m, las antenas sujetas a soportes como se observa en la Figura 12.

Figura 12. Montaje de medición de ganancia de la antena (Segundo método)

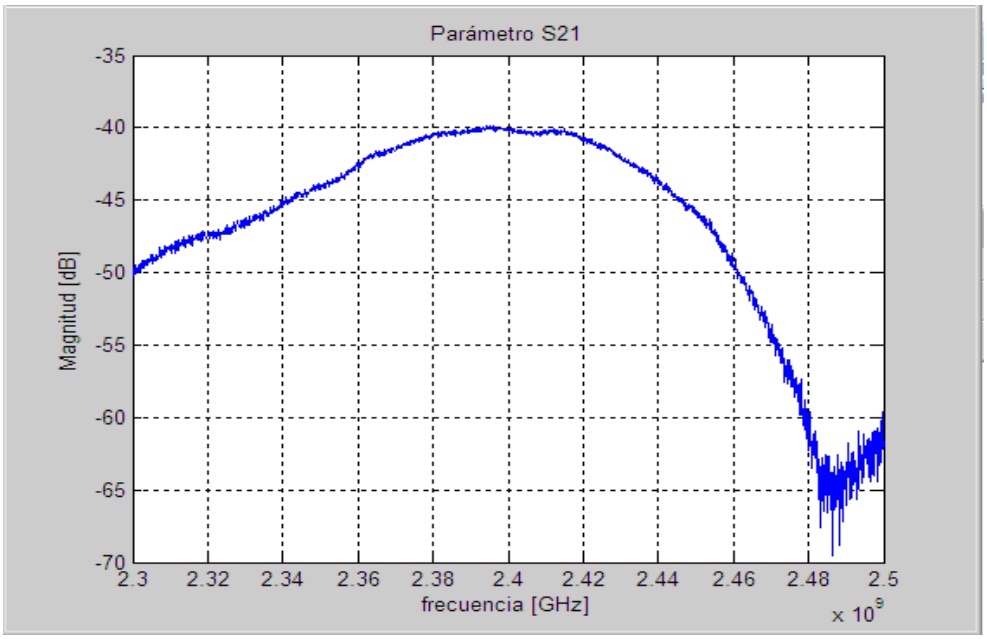
A diferencia del primer método de medición de ganancia, se realiza la calibración SOLT (Short-Open-Load-Thru) del analizador de redes para medir el parámetro S_{21} y así reemplazarlo en la ecuación 40.

$$S_{21} = \sqrt{\frac{P_r}{P_t}} \tag{39}$$

$$G_{ant} = \frac{20log(s_{21}) - P_p}{2} \quad [dB] \tag{40}$$

Igualmente al método anterior se tiene unas pérdidas de propagación correspondientes a -40.046 dB. El parámetro S_{21} a una frecuencia de trabajo de 2.45GHz es igual a -45.9897 dB como se puede observar en la Figura 13.

Figura 13. Parámetro S_{21} en un rango de frecuencia (Segundo método de medición de ganancia)



Reemplazando los valores mencionados anteriormente en la ecuación 40, se tiene que la ganancia de las antenas es igual a 3.4859 dB.

A continuación, en la Tabla 2 se detallan los datos utilizados para los dos métodos de medición de ganancia de las antenas y sus respectivos resultados.

Tabla 2. Datos y resultados de los dos métodos de medición de ganancia

	Método 1 [dBm]	**Método 2 [S_{21}]**
S_{21}		-45.9897
Pr	-29,0042	
Pt	18	18
Ganancia	3.3895 dB	3.4859 dB

Al comparar las ganancias obtenidas experimentalmente con una ganancia de referencia [14], tiene un error porcentual del 13.4% con el primer método y del 19% con el segundo método.

3.2.2 Diseño de experimentos. El diseño de experimentos se basa en hacer un estudio interviniendo en el análisis del experimento y de esta forma sacar las conclusiones pertinentes con respecto a los resultados obtenidos. Al desarrollar un análisis del diseño de un experimento hay que tener en cuenta la optimización de los procesos de su fabricación y sus métodos de análisis, entre otras cosas; considerando cada una las variables que influyen en el sistema. En este desarrollo se plantean una serie de experimentos en los cuales se obtiene el resultado de las variables que no se pueden controlar y se realiza una variación de las variables independientes del experimento.

En este proceso se pueden presentar varios inconvenientes como lo son el costo de la experimentación, el medio en el cual se realizarán las pruebas y las limitaciones de tiempo exigiendo que se ejecute sólo los experimentos fundamentales.

En el diseño de experimentos se encuentra una gran variedad de métodos que permiten obtener la información que sea necesaria. Como se había

mencionado anteriormente, por costos de la experimentación se decide realizar un diseño de experimentos con un solo factor con distintos niveles con el fin de proporcionar la información deseada por medio de un análisis de varianza y así saber si la variación de distancia influye en la atenuación de onda para un medio específico (lodo base agua con bentonita).

Se define la hipótesis como:

El aumento de la distancia afecta la atenuación de onda en el medio.

- Hipótesis nula

H_o: $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_5$

- Hipótesis alternativa

H_1: Algunas medias son diferentes

Las variables consideradas en este diseño de experimentos son:

- Factor: Distancia
- Variable a medir: La atenuación de onda
- Niveles: Se aumenta a 1cm hasta llegar al borde del tanque (35 niveles)
- Variable de respuesta: Intensidad de Señal (RSSI)
- Variable independiente: Distancia
- Variable dependiente: Potencia
- Replicas: 5 de cada nivel

Por otro lado, se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones para realizar las mediciones:

- Antes de realizar cada experimento se agitaba el lodo y de esta forma poder romper geles.
- El lodo base agua con bentonita utilizado se dejó hidratar por más de 16 horas.

- La potencia de transmisión de una de las antenas fue de 25 dBm contando con una pérdida en el cable de 5 dBm, con el fin de tener una potencia registrada de transmisión de 20 dBm.

El procedimiento detallado de los resultados obtenidos en la Tabla 3 basados en la tabla tomada de [15] se especifica en el Anexo C. Para el análisis de varianza del modelo con un solo factor y efectos fijos, tenemos que:

a=Niveles=35
n=Réplicas=5
N=Observaciones en total=175
Dando como resultado por medio del software los siguientes datos:

Tabla 3. Resultados obtenidos en SPSS para el análisis de varianza

ANOVA

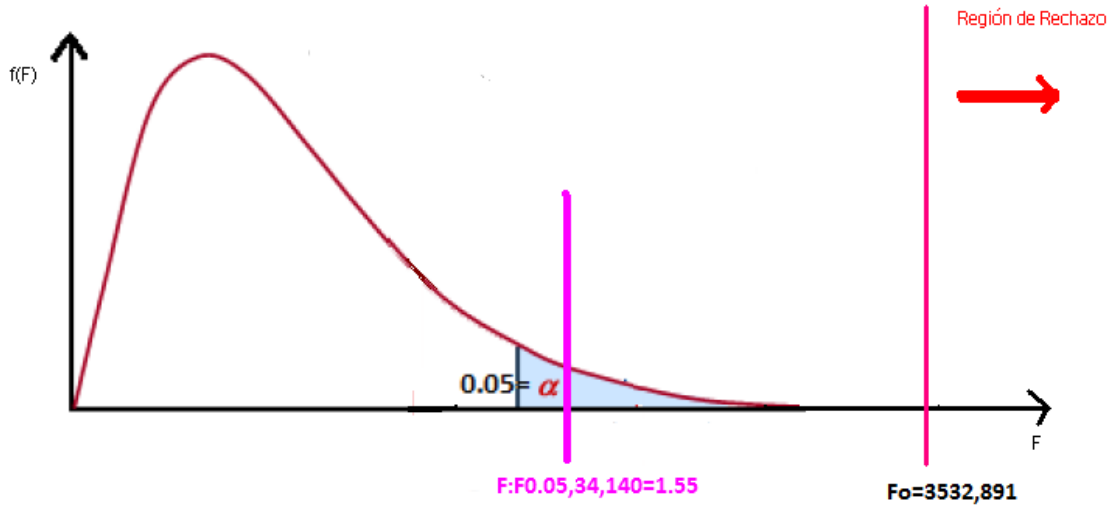
	Suma de cuadrados	**Gl (Grado de libertad)**	**Media cuadrática**	**F**
Inter-grupos	120239,034	34	3536,442	3532,891
Intra-grupos	140,141	140	1,001	
Total	120379,175	174		

El valor F de referencia con un α=0.05 de la tabla de distribución F de Fisher viene dado por F:F0.05,34,140=1.55 y su representación gráfica se puede observar en la Figura 14.

$$F_O > F_{0.05,\ 34,\ 140} \Rightarrow 3532{,}891 > 1.55$$

Por lo tanto, se concluye que el aumento de la distancia afecta la variación de la atenuación de la onda entre las antenas.

Figura 14. Representación gráfica de la distribución F de Fisher del experimento



3.2.3 Atenuación de onda en diferentes medios. Con el fin de observar el comportamiento de la atenuación de la onda dentro de distintos medios, se propone la realización de tres pruebas bajo las mismas condiciones; cabe mencionar la cantidad de liquido (70 litros) a utilizar y el uso de un tanque. El volumen del líquido se mantiene igual para todas las pruebas, asimismo se utiliza agua, agua mezclada con sal y lodo base agua con una concentración de bentonita de 12 LPB.

A continuación, para la realización de la prueba se utilizaron un par de antenas parche con iguales características, a frecuencia de operación de 2.45 GHz, las cuales se apartaron paulatinamente desde una distancia inicial de 12 cm – teniendo como base la teoría de campo lejano - esto se hizo aproximadamente cada minuto hasta llegar a los 35 cm de separación entre dichas antenas, midiendo la potencia recibida. Se registraba desde el generador de señales una potencia de transmisión de 25 dBm (Figura 15) con pérdidas en el conductor de 5 dBm con el fin de recibir una potencia total de transmisión de 20 dBm, a continuación se presentan las pruebas realizadas.

Figura 15. Potencia de transmisión del generador de señales

- **Atenuación de onda en el agua**

Para poder realizar este experimento fue necesario utilizar, tanto la antena trasmisora como la receptora – ambas envueltas con bolsas herméticas (Figura 16), y teniendo en cuenta las condiciones mínimas de seguridad para este tipo de experimentos. Se realizaron dos pruebas bajo el agua, de las cuales y tal como se observa en la Figura 17 se aprecia el comportamiento de la onda en el agua en las dos pruebas.

En la Figura 17, se puede observar la representación gráfica de los datos obtenidos en este experimento; se percibe que para una potencia de emisión de 20 dBm, la intensidad de señal (Potencia) comienza aproximadamente desde -59.795 dB hasta llegar al máximo de alejamiento de las antenas con una potencia de -140.185 dB. Estos datos se pueden apreciar en las Tablas 4,5 y 6 que fueron extraídos para las dos pruebas que se hicieron en el agua.

Figura 16. Modelo físico representativo para la realización de pruebas en agua

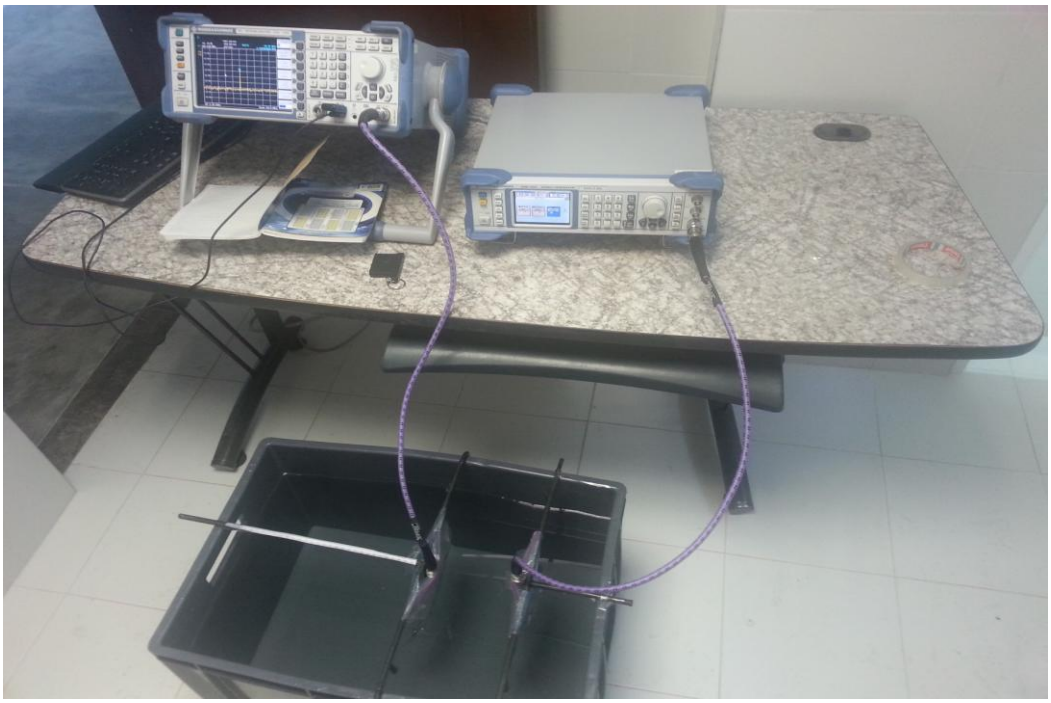


Figura 17. Atenuación de onda en el agua

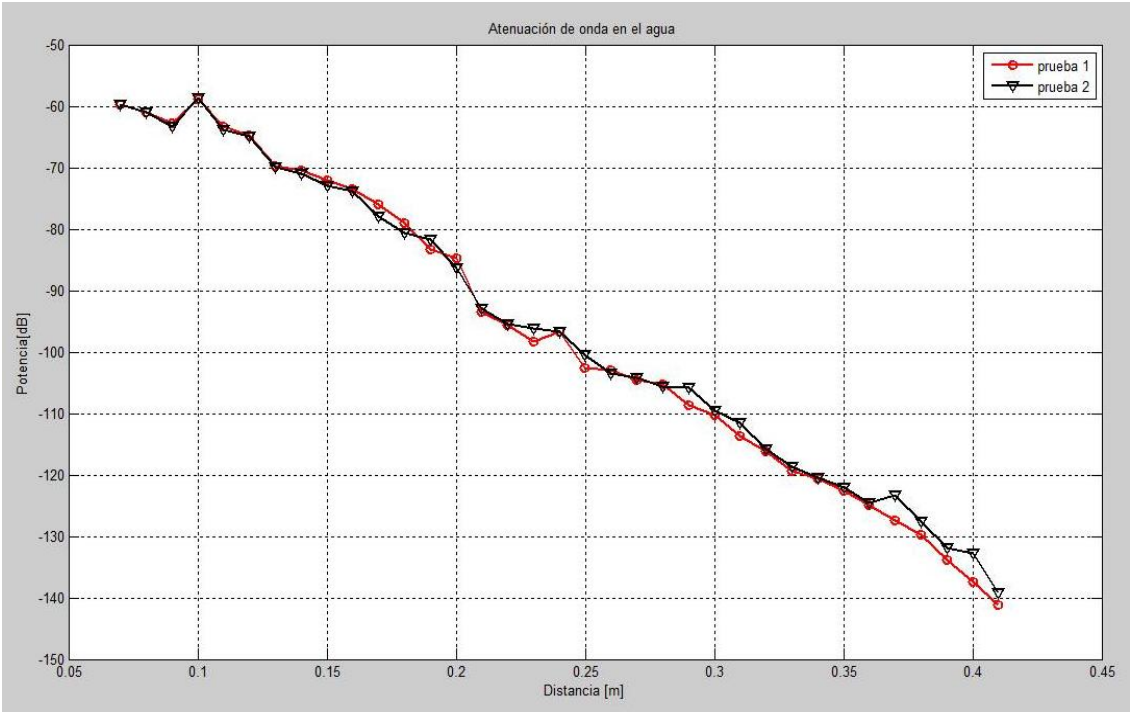


Tabla 4. Intensidad de señal de la primera prueba en agua

Distancia[m]	**0.12**	**0.13**	**0.14**	**0.15**	**0.16**	**0.17**	**0.18**
Potencia[dB]	-59,805	-60,97	--63,238	-58,694	-63,807	-64,883	-69,873
Distancia[m]	**0.19**	**0.2**	**0.21**	**0.22**	**0.23**	**0.24**	**0.25**
Potencia[dB]	-70,947	-73,001	-73,84	-77,886	-80,64	-81,714	-86,262
Distancia[m]	**0.26**	**0.27**	**0.28**	**0.29**	**0.3**	**0.31**	**0.32**
Potencia[dB]	-92,869	-95,507	-96,123	-96,679	-100,435	-103,534	-104,111
Distancia[m]	**0.33**	**0.34**	**0.35**	**0.36**	**0.37**	**0.38**	**0.39**
Potencia[dB]	-105,552	-105,732	-109,637	--111,544	-115,751	-118,648	-120,432
Distancia[m]	**0.4**	**0.41**	**0.42**	**0.43**	**0.44**	**0.45**	**0.46**
Potencia[dB]	-122,031	-124,566	-123,324	-127,538	-131,943	-132,73	-139,144

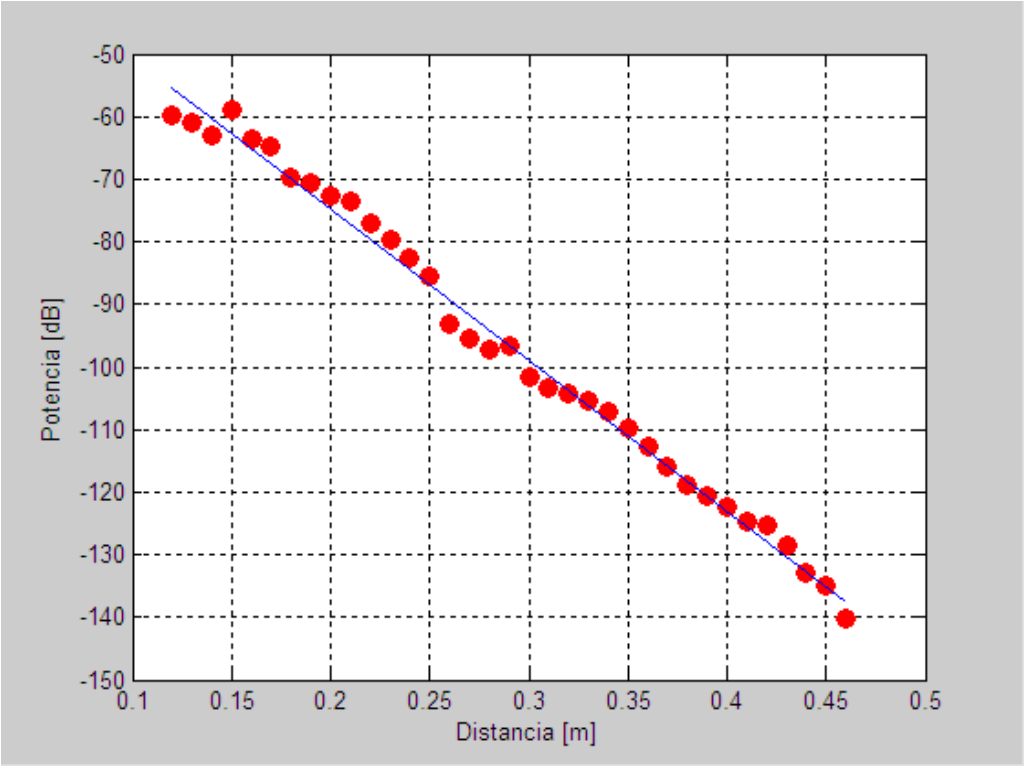
Tabla 5. Intensidad de señal de la segunda prueba en agua

Distancia[m]	**0.12**	**0.13**	**0.14**	**0.15**	**0.16**	**0.17**	**0.18**
Potencia[dB]	-59,785	-61,054	-62,753	-58,892	-63,321	-64,687	-69,695
Distancia[m]	**0.19**	**0.2**	**0.21**	**0.22**	**0.23**	**0.24**	**0.25**
Potencia[dB]	-70,369	-72,127	-73,412	-75,984	-78,936	-83,258	-84,682
Distancia[m]	**0.26**	**0.27**	**0.28**	**0.29**	**0.3**	**0.31**	**0.32**
Potencia[dB]	-93,485	-95,681	-98,363	-96,647	-102,641	-103,008	-104,553
Distancia[m]	**0.33**	**0.34**	**0.35**	**0.36**	**0.37**	**0.38**	**0.39**
Potencia[dB]	-105,324	-108,684	-110,229	-113,632	-116,247	-119,338	-120,634
Distancia[m]	**0.4**	**0.41**	**0.42**	**0.43**	**0.44**	**0.45**	**0.46**
Potencia[dB]	-122,651	-124,964	-127,352	-129,662	-133,875	-137,334	-141,226

Tabla 6. Intensidad de señal promedio de las dos pruebas realizadas en agua

Distancia[m]	**0.12**	**0.13**	**0.14**	**0.15**	**0.16**	**0.17**	**0.18**
Potencia[dB]	-59,795	-61,012	-62,996	-58,793	-63,564	-64,785	-69,784
Distancia[m]	**0.19**	**0.2**	**0.21**	**0.22**	**0.23**	**0.24**	**0.25**
Potencia[dB]	-70,658	-72,564	-73,626	-76,935	-79,788	-82,486	-85,472
Distancia[m]	**0.26**	**0.27**	**0.28**	**0.29**	**0.3**	**0.31**	**0.32**
Potencia[dB]	-93,177	-95,594	-97,243	-96,663	-101,538	-103,271	-104,332
Distancia[m]	**0.33**	**0.34**	**0.35**	**0.36**	**0.37**	**0.38**	**0.39**
Potencia[dB]	-105,438	-107,208	-109,933	-112,588	-115,999	-118,993	-120,533
Distancia[m]	**0.4**	**0.41**	**0.42**	**0.43**	**0.44**	**0.45**	**0.46**
Potencia[dB]	-69.180	-70.405	-70.437	-71.156	-71.187	-71.312	-71.578

Figura 18. Atenuación de onda en el agua (datos promedio)



La ecuación que define el comportamiento de la grafica anterior está dada por

$$y = -241.47x - 26.372 \quad (41)$$

La pendiente de la ecuación 41 viene dada por un factor de atenuación expresado en decibeles de $-20\log(e) = -8.68\,dB$. Por lo tanto, se divide el valor de la pendiente por el factor de atenuación, dando como resultado la constante de atenuación $\alpha = 23{,}5824\ \mathrm{Np/m}$.

- **Atenuación de onda en agua con sal**

La composición química del agua dulce tiene una proporción de 96.5 por ciento de agua y 3.5 por ciento de sales. La concentración de salinidad media en el agua de mar en los océanos es de 34 partes por mil (ppm), es decir que, por cada litro de agua hay 35 gramos de sal. Para efectos de la experiencia de simular agua de mar artificial en donde se utiliza cloruro de sodio como agente general. Subsiguientemente, fueron aplicadas las pruebas en diferentes grados de salinidad, como se observa a continuación con una concentración salina (S):

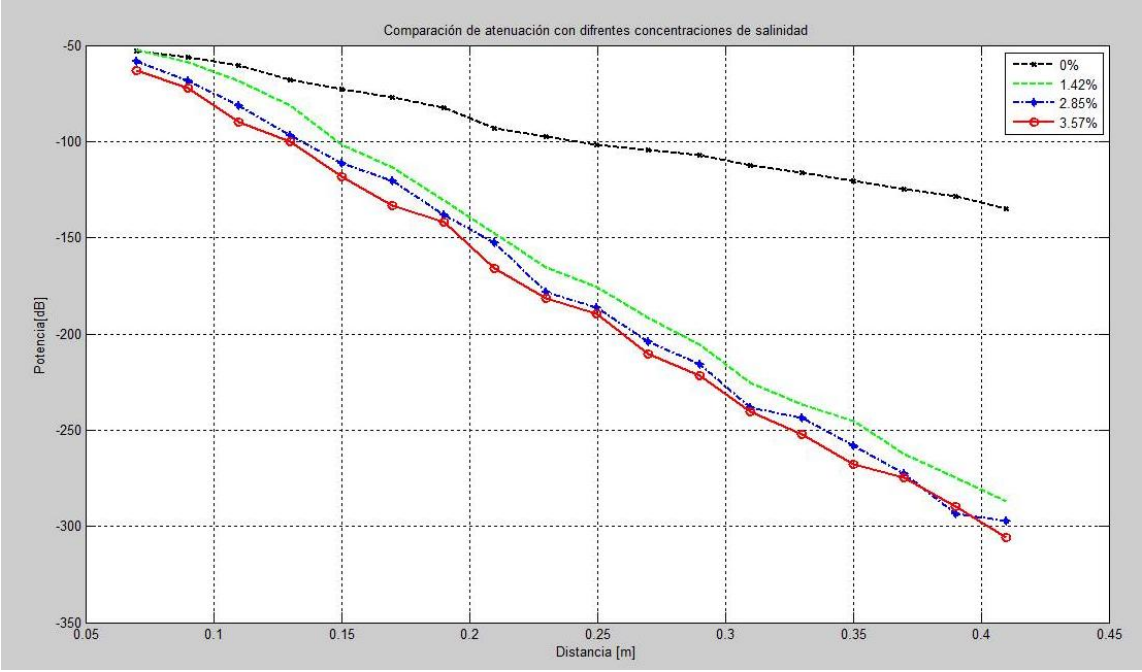
1.42 % -1000 gr
2.85 % - 2000 gr
3.57 % - 2500 gr

No sobra mencionar que se utilizaron las mismas condiciones a las que fueron sometidas las pruebas de agua sin sal. Al momento de utilizar las concentraciones de sal en el tanque con agua se procede a tomar los datos en distintas pruebas a una frecuencia 2.45 GHz. Estos valores son presentados a continuación en la Figura 19 junto con los datos de agua sin sal (0%).

En la Figura 19 se observa la confrontación entre potencia y distancia en las diferentes concentraciones de sal propuestas anteriormente para las pruebas,

con el fin de observar el comportamiento de la onda según la salinidad. Se tomaron los valores de las réplicas de cada prueba para la realización de este análisis, en las mismas se puede ver que bajo una concentración de 1.42 % se presentan menor atenuación que las restantes 2.85% y 3.57%, asimismo, estas últimas son semejantes ya que su concentración es muy parecida la una a la otra, según se aclara, debido a que a mayor concentración de sal en el medio se va atenuando considerablemente la señal electromagnética.

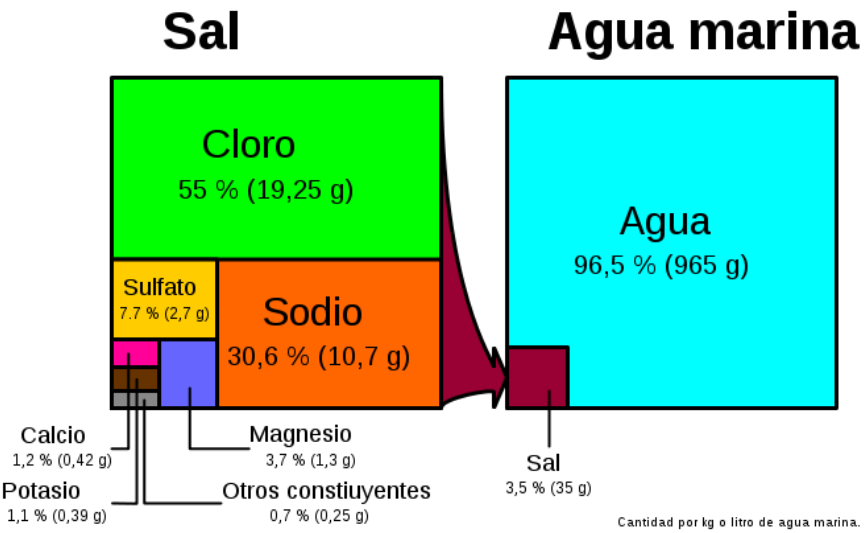
Figura 19. Comparación de atenuación de onda de las diferentes concentraciones de salinidad y agua sin sal



De acuerdo a la ecuación 22, se procede a reemplazar los parámetros electromagnéticos del agua de mar [16] obteniendo aproximadamente una constante de atenuación de 82.89 Np/m que comparado con el valor correspondiente al agua sin sal de 23,5824 Np/m., muestra una gran diferencia entre ellos, como se puede observar en la Figura 19.

No obstante, se debe tener en cuenta en esta prueba de agua con sal, que la solución utilizada en base al cloruro de sodio, es decir, sal común, (Figura 20**)** es una aproximación a la que actualmente conforma el agua del mar.

Figura 20. Composición de sal marina



Tomada de internet http://es.wikipedia.org/wiki/Sal

- **Atenuación de onda en lodo base agua con bentonita**

Luego de realizar el montaje (Figura 21) para las pruebas realizadas en lodo base agua con bentonita se realizaron réplicas del experimento con una potencia de transmisión de 20 dBm (Figura 22). Antes de realizar cada experimento se agitó el lodo para romper geles. La formulación del lodo está estipulada en la sección 3.2.

Figura 21. Modelo físico representativo para la realización de pruebas en lodo base agua con bentonita

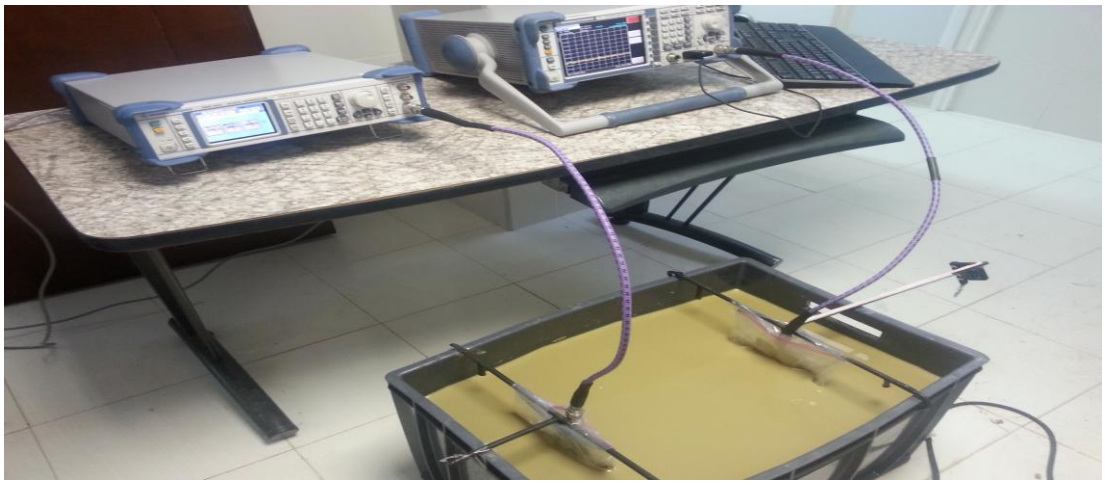
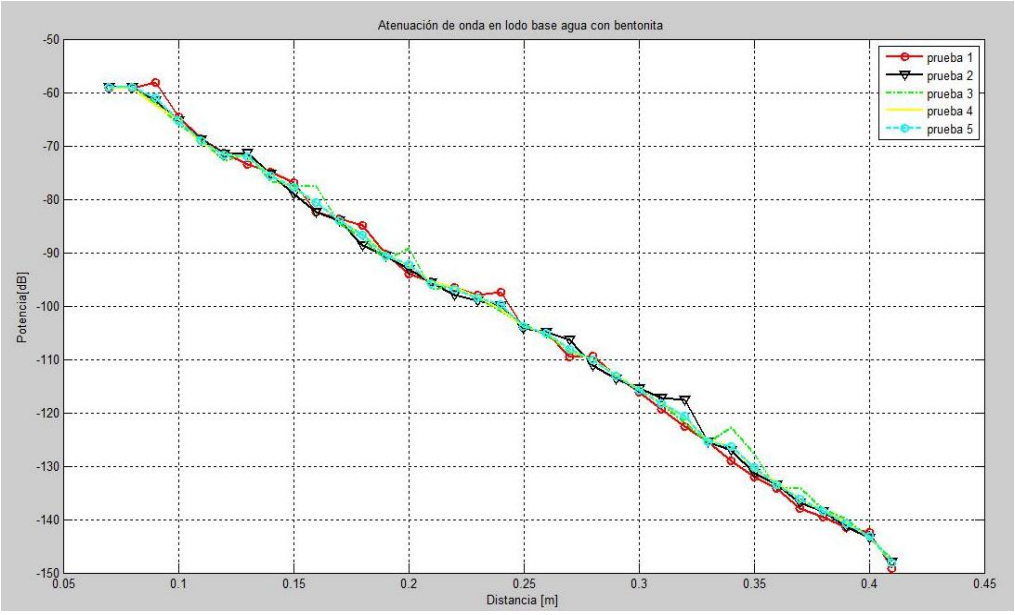


Figura 22. Atenuación en el lodo base agua con bentonita de todas las réplicas



En la Figura 22 se puede comprobar la similitud de los datos (Tabla 7, 8, 9, 10 y 11) y semejanza de las pruebas en lodo base agua con bentonita, donde se estima la atenuación por la pérdida de potencia directamente proporcional a la distancia donde se ve claramente la atenuación desde -59,001 dB hasta -148,185 dB.

Tabla 7. Intensidad de señal de la primera réplica en lodo base agua con bentonita

Distancia	**0.12**	**0.13**	**0.14**	**0.15**	**0.16**	**0.17**	**0.18**
Potencia	-59,12	-59,1405	-58,157	-64,568	-68,583	-71,389	-73,568
Distancia	**0.19**	**0.2**	**0.21**	**0.22**	**0.23**	**0.24**	**0.25**
Potencia	-74,924	-76,871	-82,345	-83,586	-84,9401	-90,265	-94,004
Distancia	**0.26**	**0.27**	**0.28**	**0.29**	**0.3**	**0.31**	**0.32**
Potencia	-95,522	-96,433	-98,035	-97,4485	-103,975	-104,852	-109,634
Distancia	**0.33**	**0.34**	**0.35**	**0.36**	**0.37**	**0.38**	**0.39**
Potencia	-109,361	-113,156	-116,115	-119,31	-122,586	-125,385	-128,952
Distancia	**0.4**	**0.41**	**0.42**	**0.43**	**0.44**	**0.45**	**0.46**
Potencia	-132,002	-134,121	-137,891	-139,534	-141,565	-142,335	-149,231

Tabla 8. Intensidad de señal de la segunda réplica en lodo base agua con bentonita

Distancia	**0.12**	**0.13**	**0.14**	**0.15**	**0.16**	**0.17**	**0.18**
Potencia	-58,96	-58,957	-61,568	-65,264	-68,895	-71,482	-71,423
Distancia	**0.19**	**0.2**	**0.21**	**0.22**	**0.23**	**0.24**	**0.25**
Potencia	-75,357	-78,933	-82,341	-83,996	-88,687	-90,638	-93,198
Distancia	**0.26**	**0.27**	**0.28**	**0.29**	**0.3**	**0.31**	**0.32**
Potencia	-95,714	-97,9805	-98,9665	-99,942	-104,2205	-104,995	-106,362
Distancia	**0.33**	**0.34**	**0.35**	**0.36**	**0.37**	**0.38**	**0.39**
Potencia	-111,17	-113,710	-115,524	-117,228	-117,5035	-125,433	-127,12
Distancia	**0.4**	**0.41**	**0.42**	**0.43**	**0.44**	**0.45**	**0.46**
Potencia	-131,336	-133,421	-136,854	-138,541	-141,368	-143,521	-148,003

Tabla 9. Intensidad de señal de la tercera réplica en lodo base agua con bentonita

Distancia	**0.12**	**0.13**	**0.14**	**0.15**	**0.16**	**0.17**	**0.18**
Potencia	-58,92	--59,005	-62,01	-66,068	-68,863	-72,843	-71,4695
Distancia	**0.19**	**0.2**	**0.21**	**0.22**	**0.23**	**0.24**	**0.25**
Potencia	-76,6335	-77,498	-77,6335	-84,5347	-87,357	-91,287	-89,166
Distancia	**0.26**	**0.27**	**0.28**	**0.29**	**0.3**	**0.31**	**0.32**
Potencia	-96,8005	-96,389	-98,531	-100,963	-103,533	-105,484	-108,539
Distancia	**0.33**	**0.34**	**0.35**	**0.36**	**0.37**	**0.38**	**0.39**
Potencia	-110,014	-113,134	-115,696	-118,361	-121,89	-125,614	-122,7765
Distancia	**0.4**	**0.41**	**0.42**	**0.43**	**0.44**	**0.45**	**0.46**
Potencia	-127,739	-134,227	-133,9615	-138,168	-139,968	-143,474	-147,418

Tabla 10. Intensidad de señal de la cuarta réplica en lodo base agua con bentonita

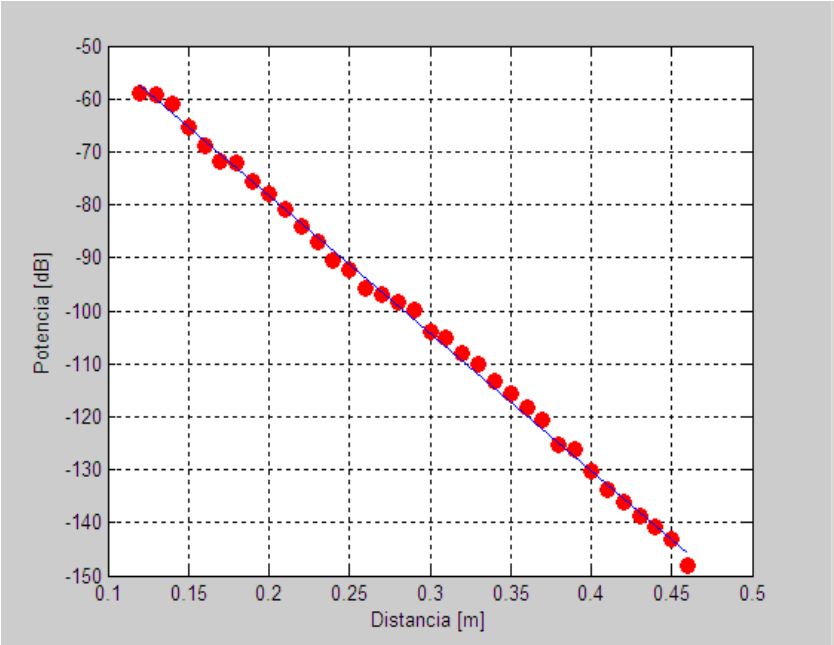
Distancia	**0.12**	**0.13**	**0.14**	**0.15**	**0.16**	**0.17**	**0.18**
Potencia	-59	-59,156	-62,425	-65,15	-69,509	-71,532	-72,006
Distancia	**0.19**	**0.2**	**0.21**	**0.22**	**0.23**	**0.24**	**0.25**
Potencia	-75,456	-77,965	-80,548	-84,005	-86,536	-90,459	-92,432
Distancia	**0.26**	**0.27**	**0.28**	**0.29**	**0.3**	**0.31**	**0.32**
Potencia	-95,365	-96,581	-98,336	-100,56	-103,795	-105,09	-108,251
Distancia	**0.33**	**0.34**	**0.35**	**0.36**	**0.37**	**0.38**	**0.39**
Potencia	-110,13	-113,006	-115,706	-118,235	-120,782	-125,325	-126,223
Distancia	**0.4**	**0.41**	**0.42**	**0.43**	**0.44**	**0.45**	**0.46**
Potencia	-130,611	-133,0345	-136,325	-138,334	-140,633	-143,22	-148,12

Tabla 11. Intensidad de señal de la quinta réplica en lodo base agua con bentonita

Distancia	**0.12**	**0.13**	**0.14**	**0.15**	**0.16**	**0.17**	**0.18**
Potencia	-59,005	-59,09	-61,05	-65,25	-68,95	-71,684	-72,105
Distancia	**0.19**	**0.2**	**0.21**	**0.22**	**0.23**	**0.24**	**0.25**
Potencia	-75,548	-77,806	-80,706	-84,0168	-86,783	-90,542	-92,15
Distancia	**0.26**	**0.27**	**0.28**	**0.29**	**0.3**	**0.31**	**0.32**
Potencia	-95,82	-96,8	-98,443	-99,753	-103,853	-105,1	-108,13
Distancia	**0.33**	**0.34**	**0.35**	**0.36**	**0.37**	**0.38**	**0.39**
Potencia	-110,1	-113,2	-115,724	-118,256	-120,66	-125,41	-126,26
Distancia	**0.4**	**0.41**	**0.42**	**0.43**	**0.44**	**0.45**	**0.46**
Potencia	-130,35	-133,568	-136,15	-138,453	-140,75	-143,11	-148,153

Por medio de los datos promedios de las replicas anteriores se obtiene la gráfica de atenuación de onda como se muestra a continuación:

Figura 23. Atenuación en el lodo base agua con bentonita con datos promedio



La ecuación que define el comportamiento de la grafica anterior está dada por:

$$y = -259.27x - 26.356 \tag{42}$$

La pendiente de la ecuación 42 viene dada por un factor de atenuación expresado en decibeles de $-20\log(e) = -8.68\,dB$. Por lo tanto, se divide el valor de la pendiente por el factor de atenuación, dando como resultado la constante de atenuación $\alpha = 26{,}8966\ \mathrm{Np/m}$.

3.3 Simulaciones

En esta sección se presentarán las simulaciones necesarias para el análisis del parámetro de atenuación de onda EM del medio en estudio. Para esto, se estableció la caracterización de la antena parche, con el propósito de utilizar esta herramienta como parte de la investigación y hacer una comparación del modelo analítico y numérico, debido a que los resultados obtenidos por medio de las simulaciones serán de utilidad para rectificar con el modelo analítico

hallado, sin olvidar la dependencia existente entre los parámetros electromagnéticos del medio (permitividad, permeabilidad y conductividad) que fueron relevantes en estudios anteriores [4] ya realizados con el apoyo de la Universidad Industrial de Santander y el Grupo de investigación RadioGIS.

El análisis propuesto depende de los parámetros de la antena utilizada en los experimentos, entre las más importantes están su ganancia, directividad e impedancia. Para su caracterización se utilizó el apoyo del software especializado en simulaciones, CST MICROWAVE STUDIO de la empresa CST (Computer Simulation Technology), el cual es una herramienta especializada de la industria para la simulación de procesos electromagnéticos en tres dimensiones de baja y alta frecuencia; utiliza el método Finite Integration Technique (FIT) que es muy similar al de Diferencias Finitas en el Dominio del Tiempo (FDTD) [17].

3.3.1 Simulaciones de los parámetros de la antena. En esta sección se describirá únicamente el diseño y el análisis en 2D y 3D de una antena impresa en tecnología microstrip [13]. Dicha antena presenta ciertas características en aplicaciones de banda estrecha y con diagramas de radiación estables en frecuencia, por lo que se detallarán algunos de los parámetros de ella utilizados en este proyecto por medio de un simulador numérico (CST MICROWAVE STUDIO).

En cuanto a la selección de la antena que se utilizaría en las pruebas bajo el medio propuesto, se tuvo en cuenta tanto su tamaño como la frecuencia de resonancia con el fin de analizar y obtener resultados de algunos de los parámetros de las antenas que se necesitaron para la comparación con un modelo analítico hallado.

Se propuso que la antena fuera una antena comercial, ya que ella facilitaría las especificaciones que se necesitaban para las pruebas, pero por su gran tamaño fue descartada. Por lo tanto, se adquirieron unas antenas construidas

con las especificaciones que se requerían y de un tamaño adecuado de tal forma que se pudiesen manejar y utilizar en las pruebas [13].

A continuación se presenta en la Tabla 12 las ventajas y desventajas de esta antena:

Tabla 12. Ventajas y desventajas de la antena parche

Ventajas	**Desventajas**
Bajo costo Fácil de implementar Bajo peso	Banda angosta Baja eficiencia Limitaciones en potencia

La ganancia de la antena parche oscila entre 3dB a 5 dB y depende de la geometría, materiales utilizados. Su impedancia de entrada es de 50 Ω.

De esta manera, se necesitaban antenas de buena calidad en cuanto a su fabricación, tomando como base de la investigación, un par de antenas (Figura 8) realizadas en un trabajo de investigación [13], el cual se enfocaba en una frecuencia de resonancia de 2.45 GHz, con un tamaño accesible para las pruebas, con facilidad de saber algunos parámetros como la ganancia y directividad, los cuales facilitan el análisis en el modelo analítico ya mencionado.

Para la configuración de la antena en el software, se tomaron las medidas propuestas en [13] que se pueden ver en Tabla 13, donde se expresa las dimensiones de la antena parche y sus características.

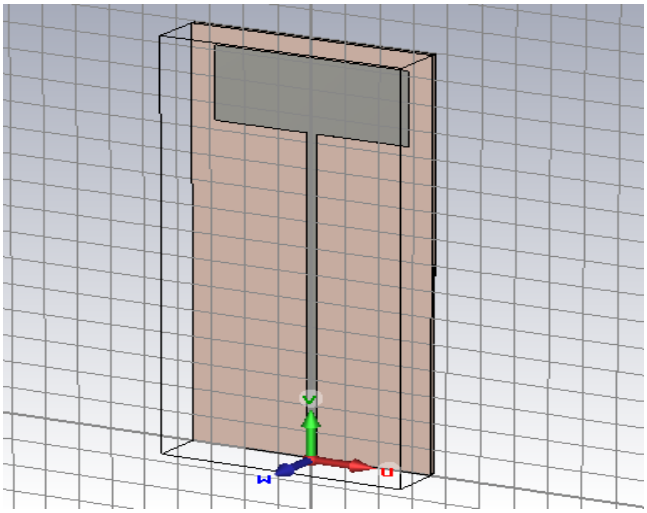
Es necesario tener en cuenta los datos de la Tabla 13 con el fin de simular la antena parche en el software en un medio virtual para así analizar algunos parámetros como la ganancia, directividad y radiación de la antena parche.

Tabla 13. Dimensiones y parámetros de la antena

Dimensiones de la antena	**Parámetros de la antena**
Ancho (W) = 57,1974 mm	Permitividad = 4.4 F/m
Largo (L) = 28,5030 mm	Grosor dieléctrico= 1,6 mm
Feed =12,35 mm	Impedancia = 50 Ω
	Placa substrato = FR4

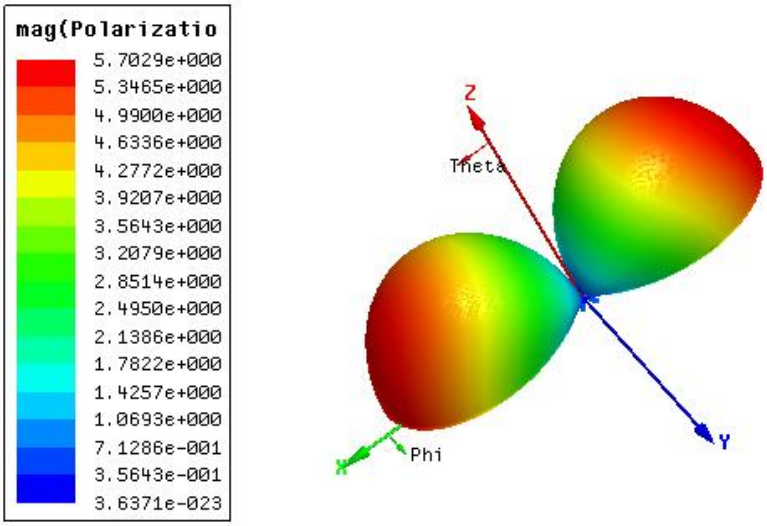
Para esto, se tomaron las dimensiones de la antena [13] en función de la longitud de onda, la velocidad de la luz y la permitividad dieléctrica de la Tabla 13, plasmándolo en la antena parche (Figura 24).

Figura 24. Representación gráfica antena parche



Las herramientas brindan comodidad al momento de la simulación al obtener la propagación del campo electromagnético (Figura 25) donde se aprecia la forma de propagación de la antena en el eje vertical en un ambiente vacio en una caja de radiación [18].

Figura 25. Propagación de la antena

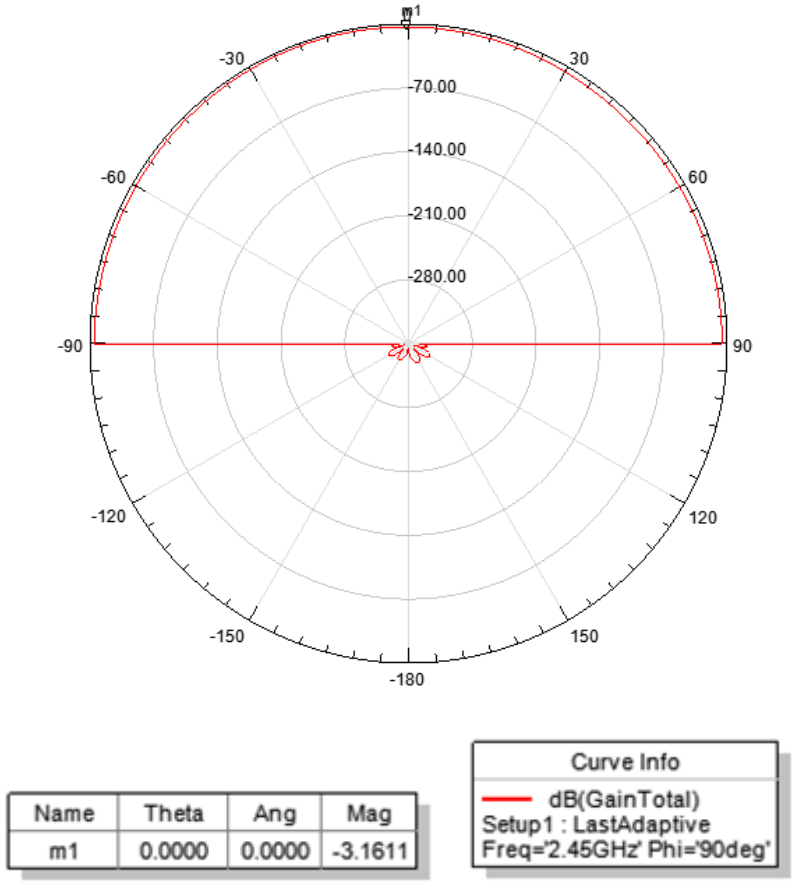


El diagrama de radiación se representa gráficamente de la forma en que la energía del campo electromagnético se propaga en el espacio, incorporada en forma cartesiana o polar. Por ello, el patrón de radiación de la antena parche es omnidireccional teóricamente, donde se considera un plano infinito en que la potencia radiada es emitida, en este caso es una sola dirección (hacia la parte superior de la antena) como se puede observar en la Figura 26 y es interrumpida hacia la dirección contraria, aunque puede llegar a suceder que emita alguna señal por la “tierra" de la antena que está en la parte opuesta del parche.

La ganancia de una antena es una manera de medir cuan directiva es una antena, en comparación con una antena isotrópica y viene expresada en dB. De manera que entre más grande sea la ganancia de una antena, ésta es más directiva y el ancho de haz es más angosto.

Por medio del método de las dos antenas detallado en la sección 3.2.1, se obtuvo una ganancia de 3.38 dB como se puede observar en la Tabla 2 y mientras que en el simulador numérico se obtuvo una ganancia de 3,16 dB (Figura 26), dando por cierto que la ganancia teórica, experimental y la simulada son semejantes.

Figura 26. Diagrama de radiación de la antena



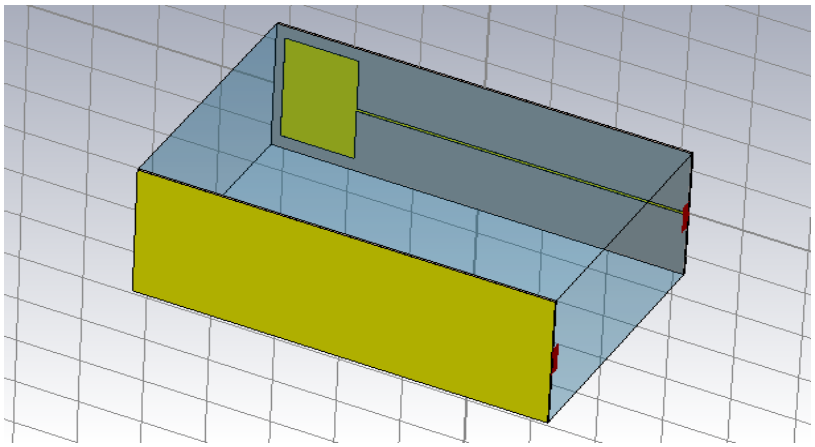
Name	Theta	Ang	Mag
m1	0.0000	0.0000	-3.1611

Cabe anotar que se realizó una segunda prueba a una distancia de 50 cm, tanto por el método de las dos antenas como por el simulador numérico con el fin de comprobar la variación de la ganancia, dando como resultado una ganancia de 3.04 dB y 3,1 dB respectivamente. Por tanto, se puede concluir que por medio del método de dos antenas se obtiene una diferencia de ganancia de 0.34 dB a dicha distancia, permitiendo definir el valor de ganancia obtenido a una distancia de 1m para el análisis de los procedimientos detallados en la sección 3.1.

3.3.2 Atenuación mediante el software CST Microwave Studio. Con el fin de realizar una semejanza a las pruebas reales en el tanque con el par de antenas (Figura 27), se implementó el diseño de las antenas parche en el software CST Microwave Studio, ubicadas frente a frente en el medio a evaluar. Cabe aclarar que dicho medio no cubre totalmente las antenas en el programa,

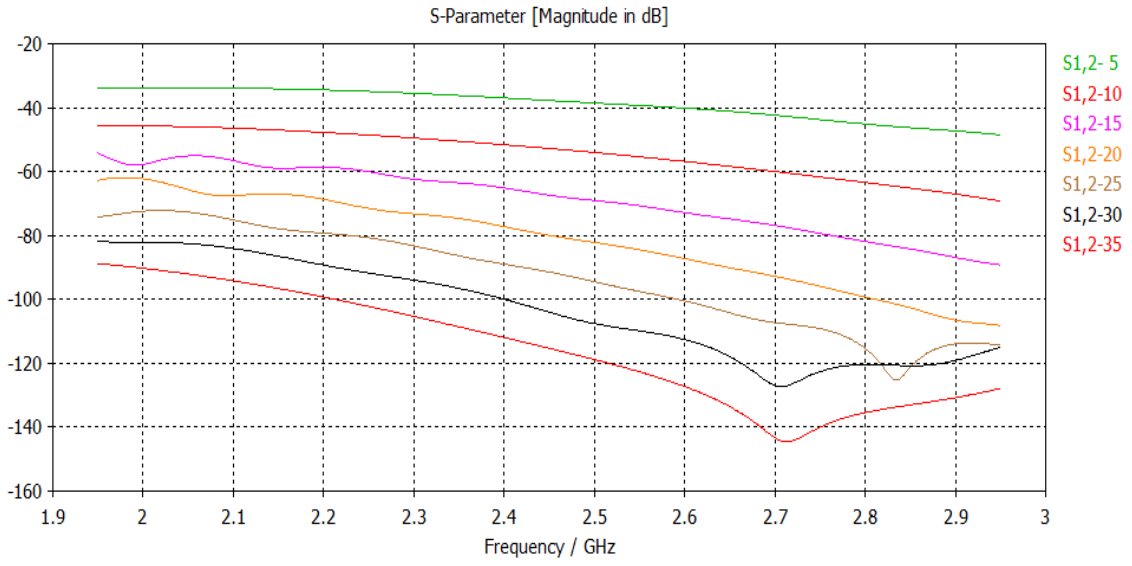
ya que no es posible hacerlo debido a que se generaría un error al momento de realizar la simulación.

Figura 27.Semejanza a las pruebas reales en el tanque con el par de antenas



Debido a que se requiere realizar el mismo procedimiento de medición en las pruebas reales y obtener los resultados por medio de la simulación, una de las antenas fue cambiando de posición desde un punto de referencia a un punto más distante, logrando así el objetivo de obtener el parámetro "S_{21}= S_{12}" en cada posición a una frecuencia principal de 2.45 GHz, como se muestra en la Figura 28.

Figura 28. Parámetros "S_{12} en cada posición en un rango de frecuencia



Para el procedimiento de la simulación fue necesario tener en cuenta: la estructura física de la antena que ha sido modelada según las especificaciones de la Tabla 13, en cuanto a los materiales y dimensiones de la antena. Por otro lado, se elige el conductor perfecto eléctrico (Perfect E) que ofrece el programa como condiciones de contorno para dicha simulación.

Por medio de la simulación en el software CST Studio se adquieren todos los datos del parámetro S_{21} de cada posición (5cm, 10cm, 15cm, 20cm, 25cm, 30cm y 35 cm) de la antena parche (Figura 28), donde se puede observar la pérdida de potencia a medida que la distancia va aumentando y de esta forma se obtiene la atenuación de onda EM en el agua como se detalla en la Figura 29 a través de una regresión lineal, donde la pendiente de la línea recta simboliza en este caso la atenuación de la onda simulada, en donde S_R-S_T se define como la Potencia

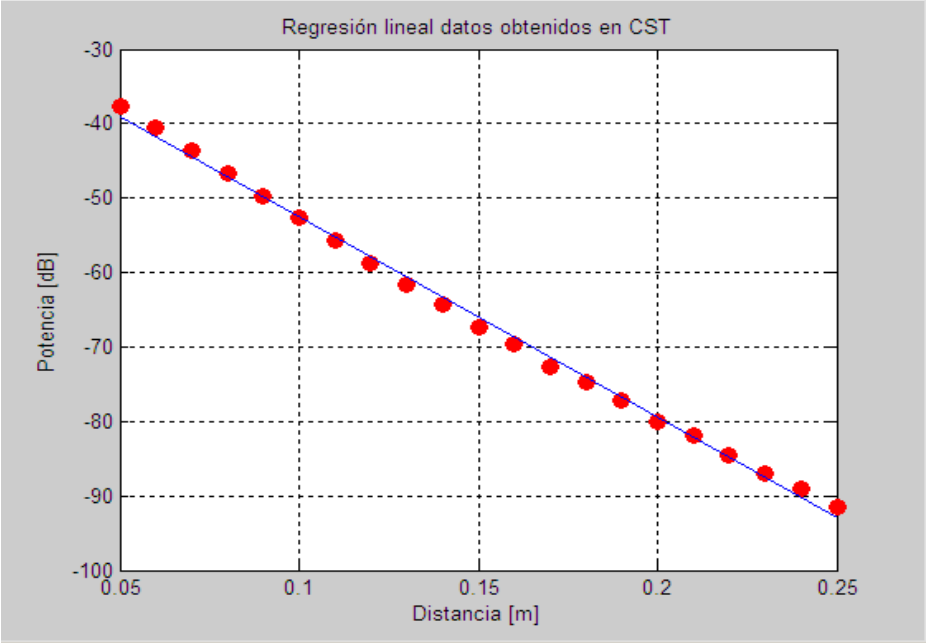
Para hallar la constante de atenuación de los datos obtenidos del simulador se necesita buscar la relación o dependencia funcional entre las dos variables X *(distancia)* y Y *(pérdida de potencia)* que mejor se ajusta a la distribución del sistema, Para esto se utiliza la regresión lineal, donde, se tiene en cuenta los dos parámetros: la pendiente y la ordenada en el origen de la recta de regresión, $y=ax+b$.

Utilizando las herramientas de Matlab, se insertan los datos simulados y obtenemos los siguientes valores: la pendiente es a=-269.645 y el error de la pendiente Δa=3.282 de la regresión de la recta y la ordenada en el origen b =-25.577 y su error Δb= 0.531.

Se determina la ecuación de la recta que mejor ajusta a los datos representados en la Figura 29 con su respectivo error ε_i, se tiene en cuenta el criterio de ajuste [19] y se encuentra dada por:

$$y = -269.645x - 25.577 \tag{43}$$

Figura 29. Atenuación de onda con datos obtenidos en CST en el agua



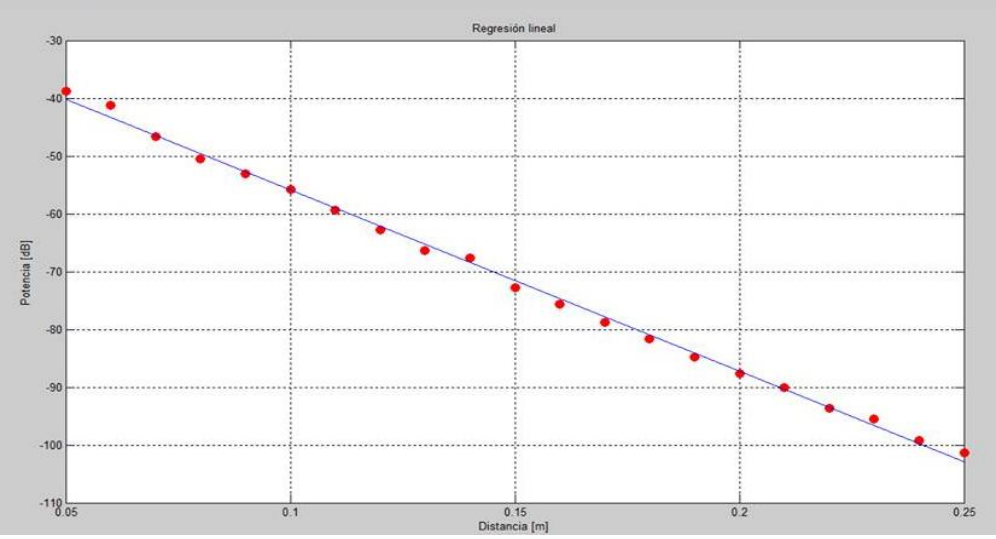
La pendiente de la ecuación 43 viene dada por un factor de atenuación expresado en decibeles de $-20\log(e) = -8.68\,dB$. Por lo tanto, se divide el valor de la pendiente por el factor de atenuación, dando como resultado la constante de atenuación $\alpha = 27.6740\ \ \mathrm{Np/m}$.

En el software CST Studio se realizó la simulación para el lodo base agua con bentonita, tomando los parámetros de dicho medio y de esta manera adquirir todos los datos del parámetro S_{21} de cada posición como se realizó para el agua en donde se observa la pérdida de potencia a medida que la distancia va aumentando y de esta forma se obtiene la atenuación de onda EM (Figura 30) a través de una regresión lineal, donde la pendiente de la línea recta simboliza en este caso la atenuación de la onda simulada, en donde S_R-S_T se define como la Potencia.

Se determina la ecuación de la recta que mejor ajusta a los datos representados en la Figura 30 y se encuentra dada por:

$$y = -313.300x - 24.585 \quad (44)$$

Figura 30. Atenuación de onda con datos obtenidos en CST en lodo base agua con bentonita



La pendiente de la ecuación 44 viene dada por un factor de atenuación expresado en decibeles de $-20\log(e) = -8.68\,dB$. Por lo tanto, se divide el valor de la pendiente por el factor de atenuación, dando como resultado la constante de atenuación $\alpha = 34.4446\ \ \mathrm{Np/m}$.

4. ANÁLISIS Y RESULTADOS

Realizando un resumen de los datos obtenidos de atenuación de onda en el agua y en el lodo base agua con bentonita, se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 14. Datos de constante de atenuación de onda en el agua y lodo base agua con bentonita

	Agua	**Lodo base agua con bentonita**
Alfa experimental [Np/m]	23,5824	26,8966
Alfa teórico [Np/m]	28.6566	30.597
Alfa simulado [Np/m]	27,674	34.4446

En la Tabla 14 se muestran los valores obtenidos de atenuación de onda de los tres métodos (experimental, teórico y numérico), observando que tanto en agua como en lodo base agua con bentonita, sus resultados son similares con cierta diferencia entre ellos.

Con el fin de obtener ciertos resultados de la Tabla 14, es necesario contar con los resultados adquiridos que se presentan en las siguientes Tablas 15 y 16 donde se indican los valores de potencia del agua y lodo base agua con bentonita tanto teóricos como experimentales y la diferencia entre ellos.

Tabla 15. Comparación de datos teóricos de potencia en agua y lodo base agua con bentonita

Distancia [m]	**Potencia (Agua) [dB]**	**Potencia (Lodo) [dB]**	**Diferencia de potencia entre los dos medios [dB]**
0,12	-59,79498	-59,00096	0,79402
0,13	-62,97931	-62,35383	0,62548
0,14	-66,11208	-65,65514	0,45694
0,15	-69,20043	-68,91203	0,2884
0,16	-72,25008	-72,13022	0,11986
0,17	-75,26574	-75,31442	0,04868
0,18	-78,25129	-78,46851	0,21722
0,19	-81,20999	-81,59575	0,38576
0,2	-84,1446	-84,6989	0,5543
0,21	-87,05747	-87,78031	0,72284
0,22	-89,95061	-90,84199	0,89138
0,23	-92,8258	-93,88572	1,05992
0,24	-95,68454	-96,913	1,22846
0,25	-98,5282	-99,9252	1,397
0,26	-101,35795	-102,92349	1,56554
0,27	-104,17484	-105,90892	1,73408
0,28	-106,9798	-108,88242	1,90262
0,29	-109,77368	-111,84484	2,07116
0,3	-112,55723	-114,79693	2,2397
0,31	-115,33111	-117,73935	2,40824
0,32	-118,09596	-120,67274	2,57678
0,33	-120,85232	-123,59764	2,74532
0,34	-123,6007	-126,51456	2,91386

0,35	-126,34156	-129,42396	3,0824
0,36	-129,07533	-132,32627	3,25094
0,37	-131,80239	-135,22187	3,41948
0,38	-134,52311	-138,11113	3,58802
0,39	-137,23781	-140,99437	3,75656
0,4	-139,9468	-143,8719	3,9251
0,41	-142,65036	-146,744	4,09364
0,42	-145,34875	-149,61093	4,26218
0,43	-148,04221	-152,47293	4,43072
0,44	-150,73097	-155,33023	4,59926
0,45	-153,41525	-158,18305	4,7678
0,46	-156,09524	-161,03158	4,93634

Tabla 16. Comparación de datos experimentales de potencia en agua y lodo base agua con bentonita

Distancia [m]	**Potencia (Agua) [dB]**	**Potencia (Lodo) [dB]**	**Diferencia de potencia entre los dos medios [dB]**
0,12	-59,795	-59,0010	0,7940
0,13	-61,012	-59,0697	1,9423
0,14	-62,996	-61,0420	1,9535
0,15	-58,793	-65,2600	6,4670
0,16	-63,564	-68,9600	5,3960
0,17	-64,785	-71,7860	7,0010
0,18	-69,784	-72,1143	2,3303
0,19	-70,658	-75,5837	4,9257
0,2	-72,564	-77,8147	5,2507
0,21	-73,626	-80,7147	7,0887
0,22	-76,935	-84,0277	7,0927
0,23	-79,788	-86,8607	7,0727
0,24	-82,486	-90,6383	8,1523
0,25	-85,472	-92,1900	6,7180
0,26	-93,177	-95,8443	2,6673
0,27	-95,594	-96,8367	1,2427
0,28	-97,243	-98,4623	1,2193
0,29	-96,663	-99,7333	3,0703
0,3	-101,538	-103,8753	2,3373
0,31	-103,271	-105,1043	1,8333
0,32	-104,332	-108,1833	3,8513
0,33	-105,438	-110,1550	4,7170
0,34	-107,208	-113,2413	6,0333
0,35	-109,933	-115,7530	5,8200
0,36	-112,588	-118,2780	5,6900

0,37	-115,999	-120,6843	4,6853
0,38	-118,993	-125,4333	6,4403
0,39	-120,533	-126,2663	5,7333
0,4	-122,341	-130,4077	8,0667
0,41	-124,765	-133,6743	8,9093
0,42	-125,338	-136,2363	10,8983
0,43	-128,600	-138,6060	10,0060
0,44	-132,909	-140,8567	7,9477
0,45	-135,032	-143,1320	8,1000
0,46	-140,185	-148,1850	8,0000

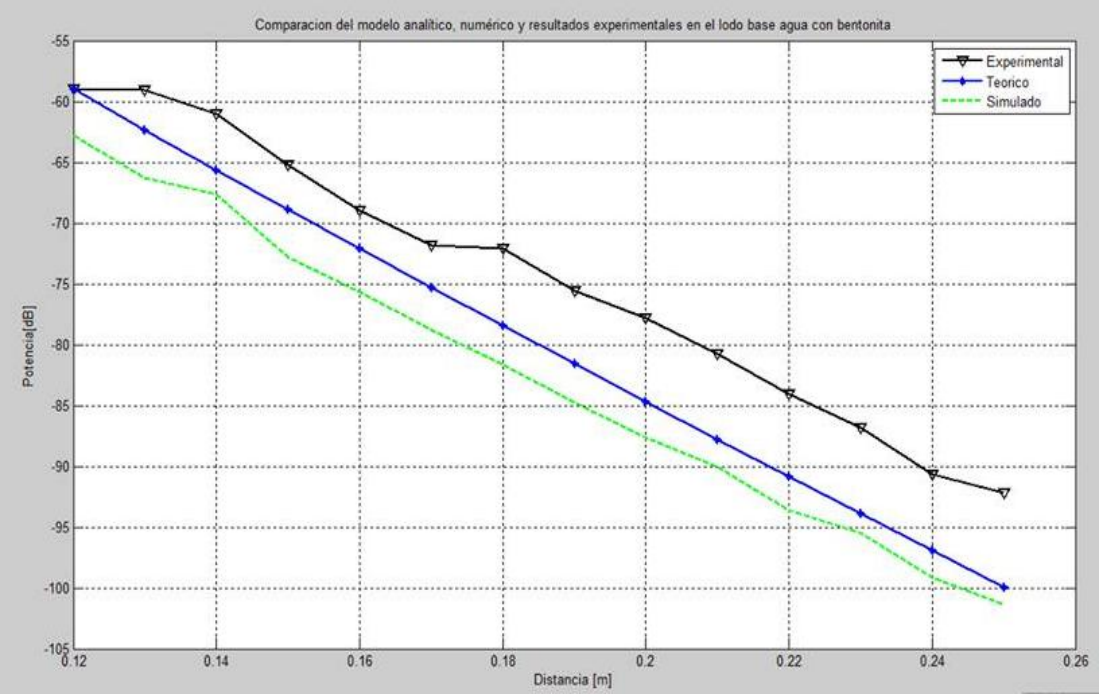
Tabla 17. Comparación de datos simulados de potencia en agua y lodo base agua con bentonita

Distancia [m]	Potencia (Agua) [dB]	Potencia (Lodo) [dB]	Diferencia de potencia entre los dos medios [dB]
0,05	-37,630565	-38,79	1,159435
0,06	-40,511765	-41,23	0,71835
0,07	-43,710482	-46,67	2,959518
0,08	-46,729133	-50,43	3,700867
0,09	-49,765015	-53,12	3,354985
0,1	-52,694150	-55,79	3,09585
0,11	-55,742653	-59,32	3,577347
0,12	-58,680409	-62,85	4,169591
0,13	-61,583569	-66,3	4,716431
0,14	-64,249087	-67,62	3,370913
0,15	-67,358175	-72,81	5,451825
0,16	-69,532403	-75,63	6,097597
0,17	-72,614837	-78,8	6,185163
0,18	-74,695599	-81,65	6,954401
0,19	-77,080120	-84,82	7,73988
0,2	-79,957970	-87,67	7,71203
0,21	-81,905454	-90	8,094546
0,22	-84,453124	-93,65	9,196876
0,23	-87,052157	-95,52	8,467843
0,24	-89,112167	-99,15	10,037833
0,25	-91,446681	-101,36	9,913319

A continuación se presenta en la Figura 31 la comparación del modelo analítico, numérico y los resultados experimentales, donde se evidencia que el

modelo analítico es válido para determinar el comportamiento de la propagación de la onda en el lodo base agua con bentonita.

Figura 31. Comparación de atenuación de onda del modelo analítico, numérico y resultados experimentales en el lodo base agua con bentonita



5. CONCLUSIONES

- Al verificar resultados teóricos, experimentales y simulados de los medios: lodo base agua con bentonita y agua, se llega a la conclusión que el comportamiento de la propagación de la onda en dichos medios es similar. Por lo tanto, cualquier estudio que aborde esta temática podrá tomar de referencia el trabajo realizado en esta investigación como respaldo para la ejecución de nuevas investigaciones.

- Debido a que los resultados finales obtenidos son similares, se puede concluir que la implementación del modelo analítico de un lodo base agua de los procesos de perforación en la industria petrolera es viable para futuros trabajos de investigación donde se pueda aplicar a condiciones más complejas y diferentes frecuencias.

- Se comprobó la hipótesis planteada: “Es posible simular la propagación de una onda electromagnética en un canal de lodo, en el cual se introduzcan algunas de las propiedades dieléctricas del canal”, dando paso a una nueva herramienta de apoyo para futuros análisis con el fin de prever resultados en mediciones reales a diferentes frecuencias y materiales, para otro tipo de estudios.

- El modelo analítico de propagación de onda seleccionado se ajusta al comportamiento lineal de la onda en el medio de estudio, teniendo en cuenta que dicho modelo depende de los parámetros electromagnéticos del medio y los parámetros de la antena, dando a lugar una ecuación que nos permita interpretar el comportamiento de la atenuación de onda.

- A partir de las mediciones realizadas experimentalmente se determina que el alcance máximo de comunicación con los parámetros de la antena utilizada es de 20 cm aproximadamente, concluyendo que dicha distancia es útil en el sector petrolero. Es por ello que en el proceso de

perforación con lodos base agua es necesario trabajar con una red de sensores con iguales características y establecer una comunicación factible entre ellos.

6. RECOMENDACIONES

- Para un futuro análisis del comportamiento de la propagación de ondas electromagnéticas en el lodo base agua, se sugiere estudiar las propiedades magnéticas de los componentes adicionales que forman los lodos de perforación, debido a que el lodo estudiado a base de agua con bentonita no tenía una respuesta magnética.

- Con el fin de caracterizar el medio, se tomaron unas antenas de fácil adquisición y fabricación para la realización de las pruebas. Sin embargo, el proyecto general está orientado en la utilización de sensores. Es por ello, que se debe tener en cuenta los diferentes tipos de antenas que pueden haber y que sean acordes a la necesidad del proyecto.

- Se sugiere tener en cuenta algunas de las propiedades más relevantes para la perforación, como por ejemplo, viscosidad, peso, PH, temperatura, presión, entre otras, ya que estos factores pueden afectar el valor de la constante de atenuación en el medio.

CITAS

[1] Wayne Tomasi, "Sistemas de comunicaciones electrónicas", Cuarta edición, 2003, Capitulo 9, Pag 347-Capitulo 10, Pag 382

[2] Sullivan, DM., “Electromgnetic simulation using the TDTD method”, Institute of Electrical and Electronic Engineers, Inc. New York. 2000. Páginas 165. ISBN: 0-7803-4747-1

[3] David K. Cheng, ”Fundamentos de electromagnetismo para ingeniería”, Centennial Professor Emeritus Syracuse, Inc. Mexico. 1998. Páginas 273-290. ISBN:968-444-327-7

[4] Lina M. Gomez, Jorge A. Anaya, “Determinación experimental de la permitividad dieléctrica del lodo de perforación base agua a 2,4 GHz enfocado a aplicaciones SensIT”, Universidad Industrial de Santander. 2013

[5] Sergio Andrés Muñoz Sarmiento, “Evaluación de la viabilidad técnica de implementar soluciones de "*SensIT"* en la perforación petrolera, a partir de un análisis de las cualidades de propagación de las ondas en lodos base agua”, Universidad Industrial de Santander. 2013

[6] Addison-Wesley Publishing Company, Inc.,United States of America, 1993, *Fundamentals of Engineering Electromagnetics*.

[7] Jinhyun Kim, "Developmente of Underwater Distance Sensor using EM Wave Attenuation" En : International Conferencia on Robotics and Automation (ICRA), Karlsruhe, Germany, May 6-10,2013

[8] J. L. Medina, E. Diaz, J.L.Olvera, R. A. Chávez, A. Velázquez “Análisis y comparación de metodologías para determinar experimentalmente la ganancia

de antenas de RF y microondas” Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, México, 2008.

[9] Angel Cardama Aznar, Lluis Jofre Roca, Juan Manuel Rius Casals, Jordi Romeu Robert, Sebastián Blanch Boris, "Antenas", Ediciones UPC,2006, México, Capitulo 9, Pag 388.

[10] Bateman, Andy Comunicaciones Digitales-Diseño para el mundo real-Marcombo S.A 2003-ISBN: 84-267-1337-8, ISBN: 0-201-34301-0 edición original Pags 95-98.

[11] H. Durney, J. Gautier, F. Ulloa “Análisis, diseño, construcción y medición de antenas helicoidales para 2.4 GHz sobre aeroplataforma de comunicaciones comunicaciones globo-antena (Haps)”, Universidad Tecnológica Metropolitana, Santiago, Chile, 2007.

[12] Balanis Constantine A., Antenna Theory Analysis and Design, John Wiley and sons, INC., Segunda edición , Nueva York, 1997.

[13] G.G. Mogollón, H. M. Quiroz “Estudio e implementación del algoritmo Spiral Multipoint Optimization con aplicaciones en el diseño del filtro y antenas impresas” Universidad Industrial de Santander” Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, UIS 2013.

[14]M. Ramirez, “Antenas microstrip con polarización con polarización circular para sistemas de posicionamiento por satélite y aplicaciones RFID”, Universidad Autónoma de Barcelona, 2013

[15] Kuehl, Robert. “Diseño de experimentos: Principios estadísticos para el diseño y análisis de investigaciones”. Ed. Paraninfo S.A., 2000. 2da. Edición

[16] Christian GAC, "2.4GHz Radio Transmission Measurements in a basin filled with sea water" Marine Geoscience Department / CTDI, IFREMER

[17] Kane. S. Yee, “Numerical Solution Of Initial Boundary Value Problems Involving Maxwell’s Equations In Isotropic Media”, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 14, pp. 302-307, May 1966

[18] Ansys Product, Getting Started with HFSS: A probe patch feed antenna, Mayo 2010

[19] Tambutti, Romilio y Muñoz, Héctor. “Física 1” Editorial Limusa - Noriega Editores - Primera Edición, 1994 Pag 52-53

[20] Saunders, S., Aragon-Zavala, A. "Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems". Second Edition. United Kingdom: John Wiley & Sons, Inc. 2007. 547 paginas. ISBN 978-0-470-84879-1

[21] Jesús Martínez Rueda, "Sistemas eléctricos y electrónicos de las aeronaves", Pagina 499

BIBLIOGRAFIA

Christian GAC, "2.4GHz Radio Transmission Measurements in a basin filled with sea water" Marine Geoscience Department / CTDI, IFREMER

G.G. Mogollón, H. M. Quiroz “Estudio e implementación del algoritmo Spiral Multipoint Optimization con aplicaciones en el diseño del filtro y antenas impresas” Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, UIS 2013

Jinhyun Kim, "Developmente of Underwater Distance Sensor using EM Wave Attenuation" En : International Conferencia on Robotics and Automation (ICRA), Karlsruhe, Germany, May 6-10,2013

J. L. Medina, E. Diaz, J.L.Olvera, R. A. Chávez, A. Velázquez “Análisis y comparación de metodologías para determinar experimentalmente la ganancia de antenas de RF y microondas” Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, México, 2008.

Kuehl, Robert. “Diseño de experimentos: Principios estadísticos para el diseño y análisis de investigaciones”. Ed. Paraninfo S.A., 2000. 2da. Edición

Lina M. Gomez, Jorge A. Anaya, “Determinación experimental de la permitividad dieléctrica del lodo de perforación base agua a 2,4 GHz enfocado a aplicaciones SensIT”, Universidad Industrial de Santander. 2013

Sergio Andrés Muñoz Sarmiento, “Evaluación de la viabilidad técnica de implementar soluciones de "*SensIT"* en la perforación petrolera, a partir de un análisis de las cualidades de propagación de las ondas en lodos base agua”, Universidad Industrial de Santander. 2013

ANEXO A: Parámetros de las antenas

Diagrama de radiación: El diagrama de radiación de una antena se define como la representación gráfica de las características de radiación en función de la dirección angular. [20]

Ancho de banda: Es el margen de frecuencias dentro del cual el funcionamiento de la antena se ajusta con respecto a una característica ó cumple con un estándar específico.

Directividad: Poder de concentración de potencia radiada de una antena en una determinada dirección.

Ganancia: La ganancia es la relación entre dos magnitudes físicas iguales, en este caso energías y comúnmente es referida en dBi's. Por tanto la ganancia de una antena se define como la energía radiada de ella comparada con la que saldría de una antena isotrópica. Una antena isotrópica es aquella que irradia en todas las direcciones con igual intensidad y su diagrama o patrón de radiación es una esfera.

Eficiencia: La eficiencia de una antena se puede definir como la relación entre la potencia total que ella radie y la potencia que entregue a la antena.

Apertura de haz: Es la separación angular entre dos puntos de media potencia (-3dB) en el lóbulo mayor de la grafica de radiación de una antena, que se suele tomar en uno de los planos "principales". La abertura del haz de una antena se llama a veces ancho de haz de -3dB, o ancho de haz de media potencia, o ancho de lóbulo. Entre más grande es la ganancia de la antena, la abertura del haz es menor, es decir, son inversamente proporcionales. [1].

Polarización: Una onda electromagnética está formada por campos eléctricos y magnéticos que se propagan en el espacio. La polarización de esta onda se

determina con la dirección del campo eléctrico. Por tanto, se define la polarización de la antena como la orientación del campo eléctrico emitido por una antena.

Abertura efectiva: Es la relación existente entre la potencia recibida por la antena y la densidad de potencia. Cada antena se supone que tiene un área de recepción, de acuerdo con la cual puede recibir más o menos potencia. [21]

Si la antena es isotrópica, la apertura efectiva se define como:

$$A_e = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_R \qquad (45)$$

ANEXO B: Conceptos básicos relacionados al diseño de experimentos

Experimento: Situación que provoca un fenómeno en unas condiciones determinadas con el fin de analizar sus efectos o de comprobar una hipótesis

Factor: Es la variable independiente. Es la variable que controla el experimentador y de esta forma estudiar los efectos sobre la variable dependiente. Puede ser cualitativa o cuantitativa.

Nivel: Es cada una de las categorías o valores específicos del factor que se deben tener en cuenta al momento de realizar el experimento

Réplica: Repetición del experimento fundamental. Se puede estimar el error experimental y con ello se puede establecer si las diferencias encontradas en los datos son estadísticamente significativas

Covariada: Es la variable dependiente. Es la variable que puede afectar la respuesta, pero no pueden controlarse en el experimento

Error experimental: Se puede definir como una perturbación que surge ante la dificultad de controlar todas las variables que puedan influenciar en un experimento

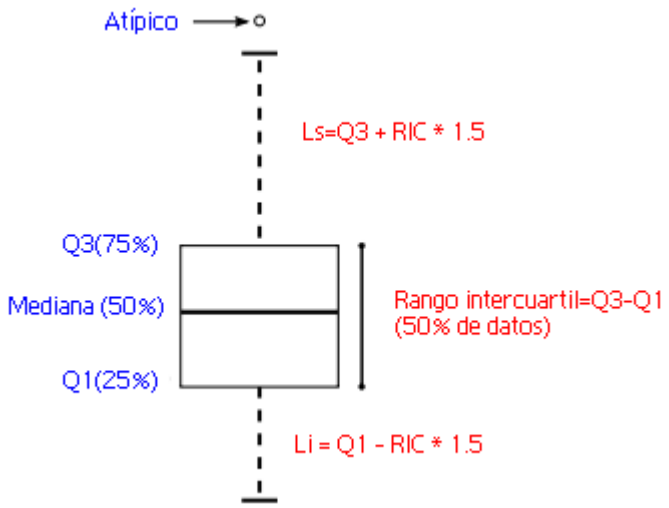
Análisis de varianza (Anova): Se basa en contrastar diferentes niveles de la ó las variables independientes en el experimento que permita determinar si hay diferencias significativas en la variable de respuesta

Distribución F de Fisher: En la experimentación es la distribución más importante ya que permite realizar cálculos sobre varianzas con cierta dispersión y de esta forma establecer si las diferencias mostradas son relevantes para atribuir cambios significativos en el comportamiento de las poblaciones en estudio

Modelo de efectos fijos: Consiste en que los niveles puede ser elegidos por el experimentador. Con ello se pretende aplicar únicamente las conclusiones a los niveles del factor, considerados en el análisis.

Diagrama de cajas: Es un gráfico, basado en cuartiles, los cuales son tres valores que dividen al conjunto de datos ordenados en cuatro partes porcentualmente iguales. A través de él se visualiza un conjunto de datos. Está compuesto por un rectángulo, la "caja", y dos brazos, los "bigotes". Suministra información sobre los valores mínimo y máximo, los cuartiles Q1, Q2 o mediana y Q3, y sobre la existencia de valores atípicos y la simetría de la distribución.

Figura 32.Esquema de un diagrama de cajas



ANEXO C. Diseño de experimentos en SPSS

Partiendo de los conceptos relacionados al diseño de experimentos (Ver Anexo B), se procede a mencionar paso a paso el procedimiento para el desarrollo del diseño de experimentos planteado, a través de la ayuda de un software estadístico llamado IBM SPSS Statistics 19 (Versión estudiantil).

Por medio de los datos obtenidos de las cinco réplicas de potencia registrada (S_R-S_T) por cada distancia de uno de los lodos preparados, se detallan en la Tabla 18, se crea una base de datos en el software con dichos datos como se muestra en la Figura 33.

Tabla 18. Datos obtenidos del experimento con lodo base agua con bentonita

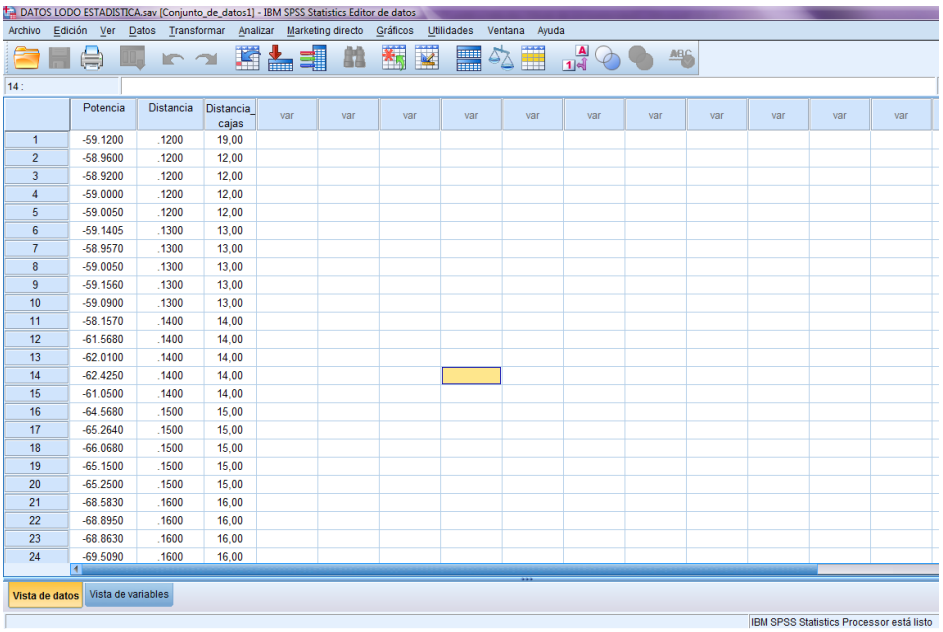
Distancia [m]	Primera réplica [dB]	Segunda Réplica [dB]	Tercera Réplica [dB]	Cuarta Réplica [dB]	Quinta réplica [dB]
0,12	-59,12	-58,96	-58,92	-59	-59,005
0,13	-59,1405	-58,957	-59,005	-59,156	-59,09
0,14	-58,157	-61,568	-62,01	-62,425	-61,05
0,15	-64,568	-65,264	-66,068	-65,15	-65,25
0,16	-68,583	-68,895	-68,863	-69,509	-68,95
0,17	-71,389	-71,482	-72,843	-71,532	-71,684
0,18	-73,568	-71,423	-71,4695	-72,006	-72,105
0,19	-74,924	-75,357	-76,6335	-75,456	-75,548
0,2	-76,871	-78,933	-77,498	-77,965	-77,8065
0,21	-82,345	-82,341	-77,6335	-80,548	-80,706
0,22	-83,586	-83,996	-84,5347	-84,005	-84,0168
0,23	-84,9401	-88,687	-87,3574	-86,536	-86,783
0,24	-90,265	-90,638	-91,2875	-90,459	-90,542
0,25	-94,004	-93,198	-89,166	-92,432	-92,15
0,26	-95,522	-95,714	-96,8005	-95,365	-95,82

0,27	-96,433	-97,9805	-96,389	-96,581	-96,8
0,28	-98,035	-98,9665	-98,531	-98,336	-98,443
0,29	-97,4485	-99,942	-100,963	-100,56	-99,753
0,3	-103,975	-104,2205	-103,533	-103,795	-103,853
0,31	-104,852	-104,995	-105,4845	-105,09	-105,1
0,32	-109,634	-106,3625	-108,539	-108,251	-108,13
0,33	-109,361	-111,17	-110,014	-110,13	-110,1
0,34	-113,156	-113,7105	-113,134	-113,006	-113,2
0,35	-116,115	-115,524	-115,696	-115,706	-115,724
0,36	-119,31	-117,228	-118,361	-118,235	-118,256
0,37	-122,586	-117,5035	-121,89	-120,782	-120,66
0,38	-125,385	-125,433	-125,6135	-125,325	-125,41
0,39	-128,952	-127,12	-122,7765	-126,223	-126,26
0,4	-132,002	-131,336	-127,7395	-130,611	-130,35
0,41	-134,121	-133,421	-134,227	-133,0345	-133,568
0,42	-137,891	-136,854	-133,9615	-136,325	-136,15
0,43	-139,534	-138,541	-138,168	-138,334	-138,453
0,44	-141,565	-141,368	-139,9675	-140,633	-140,75
0,45	-142,335	-143,521	-143,474	-143,22	-143,11
0,46	-149,231	-148,003	-147,418	-148,12	-148,153

Se puede observar en la Figura 34 la programación de las variables que se necesitan para el diseño del experimento. Esto es, en la pestaña vista de variables donde se especifica cada casilla con respecto a su significado. A continuación, se define a que corresponde cada casilla:

- Nombre: Nombre de la variable
- Tipo: Existe la posibilidad de escoger si es numérico, coma, puntos, notación científica, entre otros. En este caso se escoge la opción Coma, ya que se trabajará con datos con decimales.

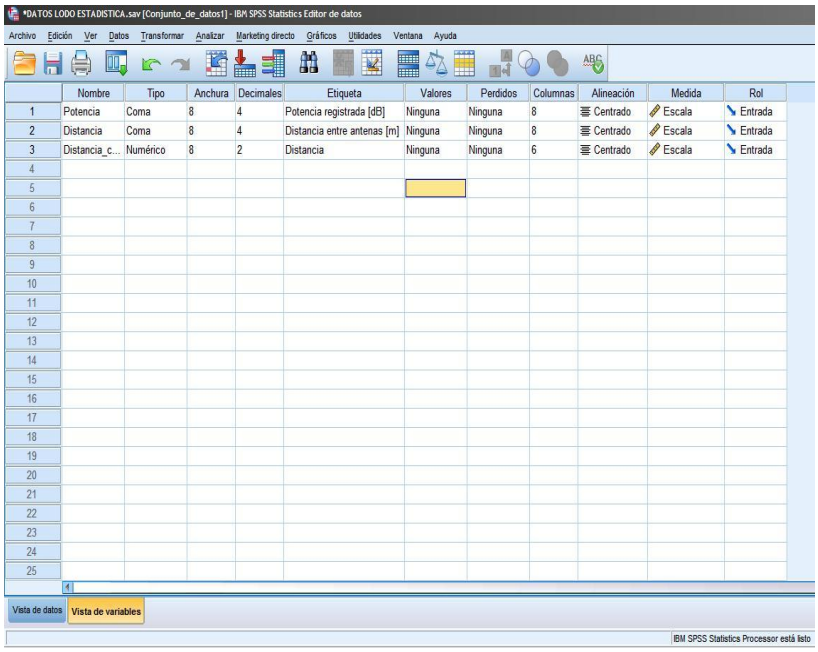
Figura 33. Registro de datos en el software estadístico



- Anchura: Distancia o cuantos dígitos va a tener como limite la respuesta que se desea.
- Decimales: La cantidad de decimales que tengan los datos. En este caso son 4.
- Etiqueta: Alguna explicación breve de la variable.
- Valores: Se utiliza si se desea categorizar la variable, es decir, codificar las variables cualitativas. En este caso se selecciona Ninguno ya que no va a ser de dicha forma.
- Perdidos: Es una manera en que el software detecte cuando se digite mal algún numero.
- Columna: Ancho de la columna de los datos. Por defecto tiene un valor de 8.
- Alineación: Definir en qué parte saldrán los datos, ya sea a la izquierda, derecha ó centrado. En este caso se define como Centrado.
- Medida: Se define que tipo de variable es. En SPPS, las variables cuantitativas son las variables de Escala

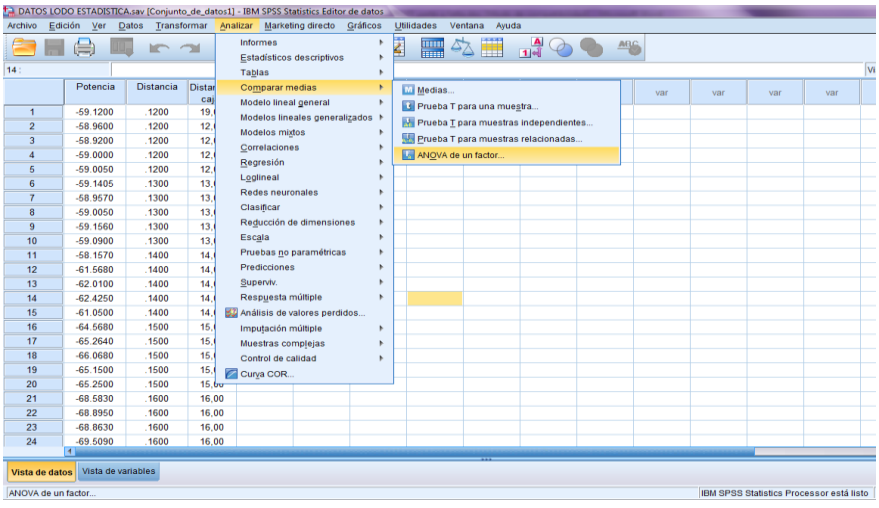
- Rol: Debido a que se introducen datos, el rol que se define es de Entrada

Figura 34. Programación de variables para el diseño de experimentos



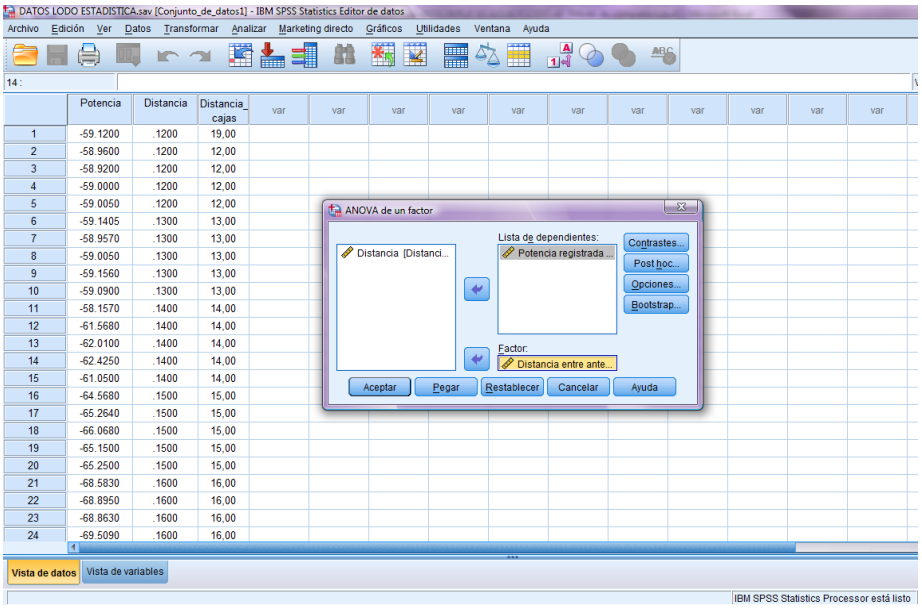
Luego de haber introducido los datos y codificado las variables, se procede a realizar el Análisis de Varianza (ANOVA) de un factor. Para ello, nos dirigimos a la pestaña Analizar-Comparar medias-ANOVA de un factor como podemos observar en la Figura 35.

Figura 35. ANOVA de un factor en SPSS



Nos aparece una ventana donde seleccionamos la variable independiente y dependiente para realizar el análisis como se muestra en la Figura 36.

Figura 36. Definición variables dependientes e independientes en SPSS



A continuación, en la Tabla 19, se muestran algunos de los resultados arrojados por el software en un archivo anexado como “ResultadoDATOS LODO ESTADISTICA” donde se puede observar:

- La distancia
- El número de réplicas: 5
- El valor de la media para cada distancia
- La desviación típica que nos informa sobre la dispersión de los datos respecto al valor de la media; cuanto mayor sea su valor, más dispersos estarán los datos
- El error típico que se refiere a las variaciones que son a menudo inevitables. El error típico puede definirse también como la variación producida por factores distorsionantes tanto conocidos como desconocidos.
- El valor máximo y mínimo de los datos registrados

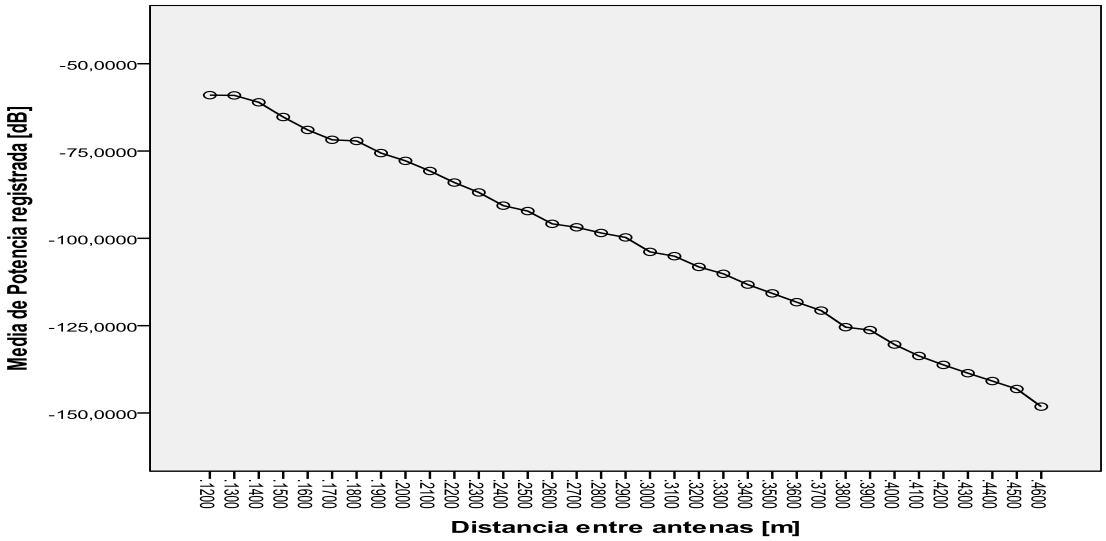
Tabla 19. Resultados obtenidos del software estadístico

	N	Media	Desviación típica	Error típico	Mínimo	Máximo
.1200	5	-59.001000	.0748665	.0334813	-59.1200	-58.9200
.1300	5	-59.069700	.0862551	.0385745	-59.1560	-58.9570
.1400	5	-61.042000	1.6918686	.7566267	-62.4250	-58.1570
.1500	5	-65.260000	.5347766	.2391594	-66.0680	-64.5680
.1600	5	-68.960000	.3381065	.1512058	-69.5090	-68.5830
.1700	5	-71.786000	.6004569	.2685325	-72.8430	-71.3890
.1800	5	-72.114300	.8687235	.3885049	-73.5680	-71.4230
.1900	5	-75.583700	.6336913	.2833954	-76.6335	-74.9240
.2000	5	-77.814700	.7523498	.3364611	-78.9330	-76.8710
.2100	5	-80.714700	1.9251226	.8609410	-82.3450	-77.6335
.2200	5	-84.027700	.3368185	.1506298	-84.5347	-83.5860
.2300	5	-86.860700	1.3585152	.6075465	-88.6870	-84.9401
.2400	5	-90.638300	.3880193	.1735275	-91.2875	-90.2650
.2500	5	-92.190000	1.8378928	.8219307	-94.0040	-89.1660
.2600	5	-95.844300	.5624706	.2515445	-96.8005	-95.3650
.2700	5	-96.836700	.6592452	.2948234	-97.9805	-96.3890
.2800	5	-98.462300	.3383219	.1513021	-98.9665	-98.0350
.2900	5	-99.733300	1.3656363	.6107311	-100.9630	-97.4485
.3000	5	-103.875300	.2516038	.1125206	-104.2205	-103.5330
.3100	5	-105.104300	.2347215	.1049707	-105.4845	-104.8520
.3200	5	-108.183300	1.1783240	.5269625	-109.6340	-106.3625
.3300	5	-110.155000	.6488821	.2901889	-111.1700	-109.3610
.3400	5	-113.241300	.2720339	.1216573	-113.7105	-113.0060
.3500	5	-115.753000	.2178210	.0974125	-116.1150	-115.5240
.3600	5	-118.278000	.7376900	.3299050	-119.3100	-117.2280
.3700	5	-120.684300	1.9492178	.8717167	-122.5860	-117.5035
.3800	5	-125.433300	.1084859	.0485164	-125.6135	-125.3250
.3900	5	-126.266300	2.2429003	1.0030555	-128.9520	-122.7765
.4000	5	-130.407700	1.6253834	.7268936	-132.0020	-127.7395
.4100	5	-133.674300	.4974492	.2224660	-134.2270	-133.0345
.4200	5	-136.236300	1.4413202	.6445780	-137.8910	-133.9615
.4300	5	-138.606000	.5372723	.2402755	-139.5340	-138.1680
.4400	5	-140.856700	.6354565	.2841848	-141.5650	-139.9675
.4500	5	-143.132000	.4774207	.2135090	-143.5210	-142.3350
.4600	5	-148.185000	.6558921	.2933239	-149.2310	-147.4180

	N	Media	Desviación típica	Error típico	Mínimo	Máximo
.1200	5	-59.001000	.0748665	.0334813	-59.1200	-58.9200
.1300	5	-59.069700	.0862551	.0385745	-59.1560	-58.9570
.1400	5	-61.042000	1.6918686	.7566267	-62.4250	-58.1570
.1500	5	-65.260000	.5347766	.2391594	-66.0680	-64.5680
.1600	5	-68.960000	.3381065	.1512058	-69.5090	-68.5830
.1700	5	-71.786000	.6004569	.2685325	-72.8430	-71.3890
.1800	5	-72.114300	.8687235	.3885049	-73.5680	-71.4230
.1900	5	-75.583700	.6336913	.2833954	-76.6335	-74.9240
.2000	5	-77.814700	.7523498	.3364611	-78.9330	-76.8710
.2100	5	-80.714700	1.9251226	.8609410	-82.3450	-77.6335
.2200	5	-84.027700	.3368185	.1506298	-84.5347	-83.5860
.2300	5	-86.860700	1.3585152	.6075465	-88.6870	-84.9401
.2400	5	-90.638300	.3880193	.1735275	-91.2875	-90.2650
.2500	5	-92.190000	1.8378928	.8219307	-94.0040	-89.1660
.2600	5	-95.844300	.5624706	.2515445	-96.8005	-95.3650
.2700	5	-96.836700	.6592452	.2948234	-97.9805	-96.3890
.2800	5	-98.462300	.3383219	.1513021	-98.9665	-98.0350
.2900	5	-99.733300	1.3656363	.6107311	-100.9630	-97.4485
.3000	5	-103.875300	.2516038	.1125206	-104.2205	-103.5330
.3100	5	-105.104300	.2347215	.1049707	-105.4845	-104.8520
.3200	5	-108.183300	1.1783240	.5269625	-109.6340	-106.3625
.3300	5	-110.155000	.6488821	.2901889	-111.1700	-109.3610
.3400	5	-113.241300	.2720339	.1216573	-113.7105	-113.0060
.3500	5	-115.753000	.2178210	.0974125	-116.1150	-115.5240
.3600	5	-118.278000	.7376900	.3299050	-119.3100	-117.2280
.3700	5	-120.684300	1.9492178	.8717167	-122.5860	-117.5035
.3800	5	-125.433300	.1084859	.0485164	-125.6135	-125.3250
.3900	5	-126.266300	2.2429003	1.0030555	-128.9520	-122.7765
.4000	5	-130.407700	1.6253834	.7268936	-132.0020	-127.7395
.4100	5	-133.674300	.4974492	.2224660	-134.2270	-133.0345
.4200	5	-136.236300	1.4413202	.6445780	-137.8910	-133.9615
.4300	5	-138.606000	.5372723	.2402755	-139.5340	-138.1680
.4400	5	-140.856700	.6354565	.2841848	-141.5650	-139.9675
.4500	5	-143.132000	.4774207	.2135090	-143.5210	-142.3350
.4600	5	-148.185000	.6558921	.2933239	-149.2310	-147.4180
Total	175	-101.543186	26.3027440	1.9883006	-149.2310	-58.1570

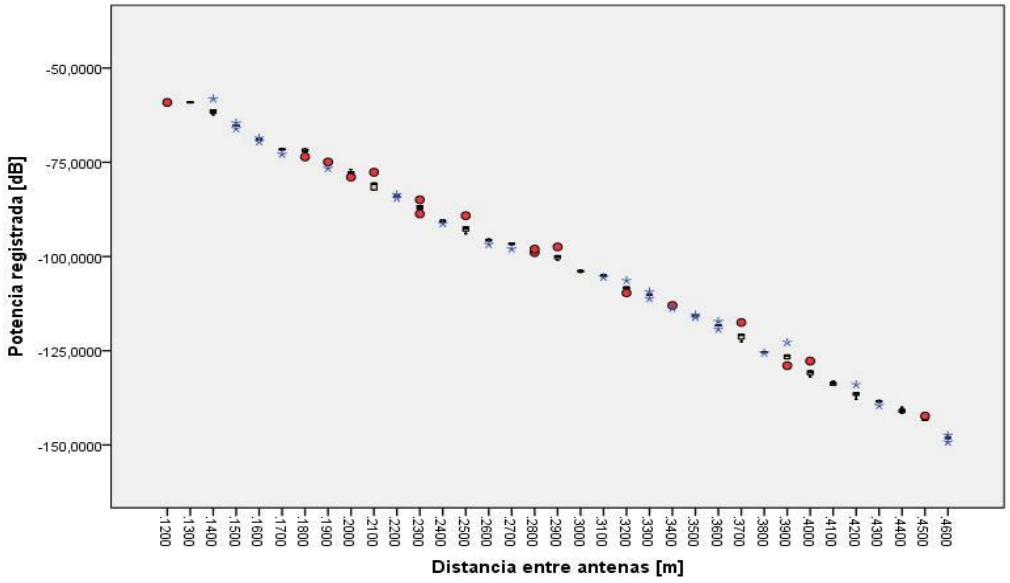
De acuerdo a los datos obtenidos de la media de la potencia (S_R-S_T) con respecto a cada distancia especificados en la tabla anterior, se realiza la gráfica de medias.

Figura 37. Media de la intensidad de señal en un rango de distancia



Además se grafica el diagrama de cajas de los datos de Potencia (Intensidad de señal) con respecto a la distancia, detallando el rango de potencia en cada distancia, y se observa por medio de un circulo o una estrella el valor atípico entre las réplicas tomadas como se muestra a continuación en la Figura 38.

Figura 38. Diagrama de cajas (Intensidad de señal Vs Distancia)



La tabla de análisis de varianza para el modelo con un solo factor y efectos fijos [15] se observa a continuación:

Tabla 20. Tabla de análisis de varianza para el modelo con un solo factor y efectos fijos

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Fo
Entre los tratamientos	$SS_{Tratamientos} = n\sum_{i=1}^{a}(\overrightarrow{Y_{i.}} - \overrightarrow{Y_{..}})^2$	a-1	$MS_{Tratamientos}$	$F_O = \frac{MS_{Tratamientos}}{MS_E}$
Error (dentro de los tratamientos	$ss_E = ss_t - SS_{Tratamientos}$	N-a	MS_E	
Total	$SS_T = \sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{n}(Y_{ij} - Y_{..})^2$	N-1		

De acuerdo a la Tabla 20 se puede concluir lo siguiente:

- $SS_{Tratamientos}$: Sumas de los cuadrados debida a los tratamientos (entre los tratamientos)
- SS_E: Suma de cuadrados debida al error (dentro de los tratamientos)
- Hay an=N observaciones en total
- Por tanto, SS_T tiene N-1 grados de libertad
- Como hay tratamientos o niveles de factor, $SS_{Tratamientos}$ tiene a-1 grados de libertad
- Para el error se tienen a(n-1)=an-a=N-a grados de libertad
- $MS_{Tratamientos}$: Estimación de la varianza si las medias de los tratamientos son iguales
- MSE: Estimación combinada de la varianza común dentro de cada uno de los a tratamientos
- Si no hay diferencias en las medias de los tratamientos, $MS_{Tratamientos}$=MS_E=varianza
- Si las medias de los tratamientos difieren, el valor esperado del cuadrado medio de los tratamientos es mayor que la varianza.

- Por tanto, se puede realizar una prueba de hipótesis de que no hay diferencias en las medias de los tratamientos comparando $MS_{Tratamientos}$ y MS_E.
- Por los cuadrados medios esperados se observa que, en general MS_E es un estimador de la varianza
- Bajo la hipótesis nula, $MS_{Tratamientos}$ es un estimador de la varianza
- Si la hipótesis nula es falsa, el valor esperado de $MS_{Tratamientos}$ es mayor que MS_E.
- Por tanto, bajo la hipótesis alternativa, el valor esperado del numerador del estadístico de prueba Fo, es mayor que el valor esperado del denominador.
- En consecuencia, Ho deberá rechazarse para valores del estadístico de prueba que son muy grandes.
- Por lo tanto, Ho deberá rechazarse y concluirse que hay diferencias en las medias de los tratamientos si

$$F_O > F_{\alpha,\ a-1,\ N-a}$$

Donde

$$Fo = \frac{SS_{Tratamientos}/(a-1)}{SS_E/(N-a)} = \frac{MS_{Tratamientos}}{MS_E} \tag{46}$$

- Se distribuye como F con a-1y N-a grados de libertad